

VILJANKUIVAUKSEN ENERGIA TEHO KUUDEN SELVITTÄMINEN SIMULOIMALLA

Tapani Viita
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Maatalousteknologia
2013

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Maataloustieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Tapani Viita			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Viljankuivauksen energiatehokkuuden selvittäminen simuloimalla			
Oppiaine — Läroämne — Subject Maatalousteknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma	Aika — Datum — Month and year 2013	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 46	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>Suomessa viljasato joudutaan lähes aina käsittelemään, jotta se säilyy varastossa. Yleisin säilöntämenetelmä on kuivaus. Kuivaukseen käytetään 11 % viljanviljelyn energiasta. EU:n energiapalveludirektiivissä on asetettu 9 %:n energiansäästötavoite vuoteen 2016 mennessä vuosien 2001 - 2005 vuosien keskiarvokulutukseen verrattuna. Maa- ja metsätalousministeriö on käynnistänyt maatilojen energiaohjelman, jolla pyritään vähentämään maatalouden energiankäyttöä.</p> <p>Työn tavoitteena oli selvittää tietokonesimuloinnin avulla, millä säädoillä viljankuivauksessa saavutetaan paras energiatehokkuus eri olosuhteissa, sekä selvittää tietokonesimulaattorin toimivuus. Tutkimuksessa tehtiin simulointisarja, jossa selvitettiin pitääkö säätoja muuttaa eri olosuhteissa, herkkyysanalyysi, jossa selvitettiin mille muuttujille kuivausprosessi on herkin sekä vertailu Viikin koetilalla tehtyjen kuivausten ja simuloinnin energiankulutuksen ja kuivausajan välillä.</p> <p>Simulointisarjan perusteella todettiin, että paras energiatehokkuus saavutetaan korkealla kuivauslämmöllä, nopealla viljan kierrolla ja pienellä ilmamäärällä. Kuivausprosessi on herkkä kuivausilman lämpötilalle, viljan kosteudelle ja kuivausilman määrälle sekä jokseenkin herkkä viljan tiheydelle ja ulkoilman lämpötilalle. Simulaattorin todettiin toimivan energiankulutuksen osalta, paitsi jos vilja on lähes varastointikelpoista (kosteus alle 17 % w.b.). Kuivausajan suhteen simulaattori taas toimi vain tapauksissa, joissa viljan kosteus oli kuivauksen alussa alle 17 %. (w.b.)</p> <p>Kuivausprosessin oikeilla säädoillä voidaan saavuttaa merkittäviä energiansäästöjä. On kuitenkin huolehdittava, että puintikosteus on mahdollisimman pieni, ja että kuivaus tehdään hyvissä olosuhteissa. Lisäksi on huolehdittava, että kuivuri on eristetty ja kuivuriuuni huollettu.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Viljankuivaus, simulointi, energian säästö, energiatehokkuus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY
OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Tapani Viita			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Energy Efficiency in Grain Drying – finding out by simulation			
Oppiaine — Läroämne — Subject Agricultural Engineering			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis	Aika — Datum — Month and year 2013	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 46	
<p>Tiivistelmä — Referat — Abstract</p> <p>In Finland grain has to handle that seeds will stay in good condition in storage. The most common method of preservation is drying. 11 % of energy consumption in a grain growing chain is used in drying. EU has set the aim to achieve 9 % energy saving by year 2016 compared to average energy consumption in years 2001-2005. Ministry of agriculture and forestry has started energy program in agriculture, which aims to energy saving in agriculture.</p> <p>The aim of this study was to find out by computer simulation how to get the best energy efficiency in grain drying in different conditions. In the study was made a series of simulations to find out is different adjustments needed in different conditions. By sensitivity analysis was found out, which variable (condition or adjustment) affects most to the drying process. To find out reliability of the simulator energy consumption and drying time results was compared between simulation and real dryings in Viikki's research farm.</p> <p>The best energy efficiency was achieved when high drying air temperature, fast grain circulation and small amount of air were used. The grain drying process is very sensitive to drying air temperature, moisture of grain and amount of air. The process is quite sensitive to density of grain and outside temperature. The simulator gives reliable results for energy consumption when grain moisture is more than 17% (w.b.) and for drying time when grain moisture is lower than 17 %.</p> <p>By adjusting grain drying process it is possible to save remarkable amount of energy. It is important to harvest and dry grain as good conditions as possible. Also is important to use isolation in dryer and maintain the burner.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Grain drying, simulation, energy saving, energy efficiency			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

SISÄLLYS

KÄSITTEET, LYHENTEET JA SYMBOLIT	6
1 JOHDANTO	7
2 KIRJALLISUUSKATSAUS: VILJANKUIVAUS.....	8
2.1. Kuivauksen perusta	8
2.1.1. Kuivauksen tarve	8
2.1.2. Kuivauksen teoria	10
2.1.3. Kuivaukseen vaikuttavat tekijät	11
2.2. Kuivuri ja sen energiankäyttö	12
2.2.1. Viljaa kierrättävä lämminilma kuivuri	12
2.2.2. Muut kuivurityypit	13
2.2.3. Kuivurin säätömahdollisuudet	14
2.2.4 Kuivurin energiankulutus ja säästömahdollisuudet	16
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	19
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	20
4.1. Tutkimuksen esittely	20
4.2. Simulaattorin esittely	20
4.3. Simulointisarja.....	21
4.4. Herkkyysanalyysi	24
4.5. Simulaattorin vertaaminen kuivurilla tehtyihin mittauksiin	24
5 TULOKSET	25
5.1. Tulosten käsittely	25
5.2. Hyötysuhteiden vaihtelu	25
5.3. Herkkyysanalyysi	26
5.3.1. Viljan tiheys.....	26
5.3.2. Ulkoilman lämpötila.....	28
5.3.3. Viljan kosteus.....	29
5.3.4. Ulkoilman suhteellinen kosteus	31
5.3.5. Kuivausilman lämpötila	32
5.3.6. Viljan kiertonopeus.....	33
5.3.7. Kuivausilman määrä	35

5.4. Simuloinnin vertaaminen kokeellisiin tuloksiin.....	36
6 TULOSTEN TARKASTELU	38
6.1. Simuloimalla saadut tulokset	38
6.1.1. Simulointisarja.....	38
6.1.2. Herkkyysanalyysi	39
6.2. Simuloinnin vertaaminen kokeellisiin tuloksiin.....	41
6.3. Virheiden arviointi	41
6.3.1. Simulaattori ja herkkyysanalyysi	41
6.3.2. Kokeelliset mittaukset	42
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	43
7.1. Simulaattorin antamat tulokset verrattuna kokeisiin	43
7.2. Energiansäästömahdollisuudet	43
7.3. Mahdolliset jatkotutkimukset	43
8 KIITOKSET	44

Käsitteet, lyhenteet ja symbolit

η	Hyötysuhde
$^{\circ}\text{C}$	Lämpötila, Celsius
E_{kok}	Kuivauserän kokonaisenergian kulutus, kWh
J	Energian yksikkö, joule
$m_{\text{vesi alussa}}$	Viljaerän sisältämä vesimäärä kuivauksen alkaessa, kg
$m_{\text{vesi lopussa}}$	Viljaerän sisältämä vesimäärä kuivauksen loppuessa, kg
RH	Suhteellinen kosteus, %
T	Lämpötila, tässä Celsius
w.b.	Wet basis, märkäperusteinen

1 JOHDANTO

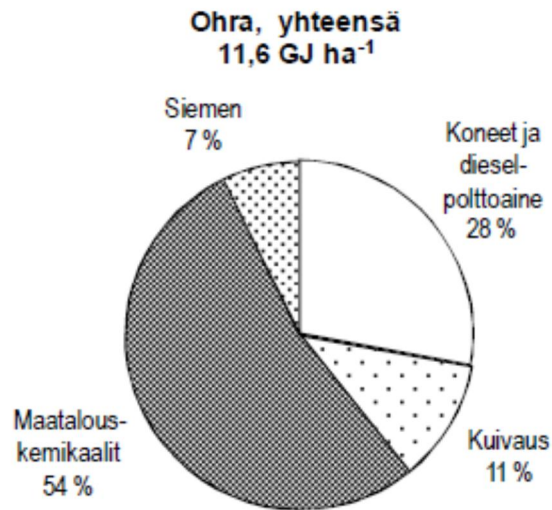
Suomessa viljaa viljellään vuosittain n. 1,2 miljoonalla hehtaarilla (Tike 2010). Viljasato on noin 4,2 milj. kg (Tike 2010). Viljasadosta puolet käytetään rehuksi ja puolet jalostetaan elintarvikkeiksi. Suomen lyhyestä kasvukaudesta ja kosteasta sadonkorjuuajasta johtuen vilja joudutaan käsittelemään, jotta se säilyy varastossa käyttökelpoisena. Pääosa sadosta kuivataan, vaikka rehukäyttöön menevä rehu voitaisiin säilöä myös muulla tavoin. Viljan kosteuden tulee olla enintään 14 massa-%, jotta se säilyy käyttökelpoisena riittävän pitkään. Viljankuivaus vaatii hyvin paljon energiaa. Koko viljelyketjun energiankulutuksesta n. 11 % menee viljankuivaukseen (kuva 1.) (Ahokas ja Mikkola 2009).

Energia on kallista ja edelleen kallistumassa. Kuivauksen osuus viljelyn kokonaiskustannuksista on myös suuri. Tämän vuoksi pienelläkin energiansäästöllä säästää merkittävästi rahaa ja näin viljelystä tulee kannattavampaa. Samalla säästetään arvokkaita uusiutumattomia luonnonvaroja. Lähes kaikki vilja kuivataan edelleen öljylämmitteisillä kuivureilla, vaikka kiinnostusta ja tutkimusta uusiutuvien polttoaineiden käyttöön kuivauksessa on ollut jo vuosia. Kuivurissa käytetystä energiasta lämmitykseen menee lähes kaikki. Pieni osa viljan kierrättämiseen, puhaltimien ym. laitteiden käyttöön sekä valaistukseen.

Tyypillisin Suomessa käytettävä kuivurityyppi on viljaa kierrättävä lämminilmaeräkuivuri. Tässä tutkimuksessa tutkitaan juuri tällaisen kuivurin toimintaa. Jonkin verran käytössä on ollut myös kylmäilmakuivureita, mutta niiden käyttö on vähentynyt viimeisten vuosikymmenten aikana. Nykyisin on kuitenkin lisääntynyt kuivaavien varastosiilojen käyttö esikuivureina. Jatkuvat toimisia kuivureita Suomessa on vain vähän, koska kuivattavan viljan määrä on yleensä suhteellisen pieni johtuen pienestä tilakoosta eivätkä olosuhteet useinkaan ole riittävän hyviä jatkuvatoimisen kuivurin käytölle.

Energiansäästöön ja energiatehokkuuteen pyritään myös yhteiskunnan toimesta. EU:n energiapalveludirektiivissä on asetettu 9 %:n

energiansäästötavoite vuoteen 2016 mennessä vuosien 2001 - 2005 vuosien keskiarvokulutukseen verrattuna. Maa- ja metsätalousministeriö on käynnistänyt maatilojen energiaohjelman, jolla pyritään vähentämään maatalouden energian käyttöä. (MMM 2009)



Kuva 1. Ohran viljelyn energian kulutuksen jakauma (Mikkola & Ahokas 2009).

2 KIRJALLISUUSKATSAUS: VILJANKUIVAUS

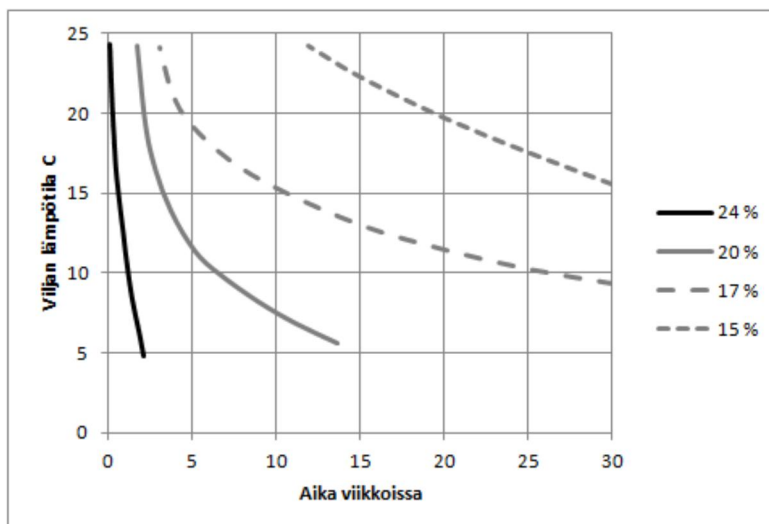
2.1. Kuivauksen perusta

2.1.1. Kuivauksen tarve

Viljan jyvät ovat biologista materiaalia. Biomateriaalit alkavat pilaantua mikrobien toiminnan, biomateriaalien entsyymitoiminnan sekä biomateriaalien hengityksen takia. Viljan entsyymitoiminta ja hengitys jatkuvat puinnin jälkeenkin, mikä tuottaa kosteutta ja lämpöä. Mikrobien kasvu riippuu kosteudesta, lämpötilasta, happipitoisuudesta, happamuudesta ja materiaalin fysikaalisesta kunnosta. Mikrobien kasvuun vaikuttavia olosuhteita muuttamalla pyritään estämään mikrobien kasvu ja biomateriaalin pilaantuminen. Kuivauksen tarkoituksena on kuivata vilja niin kuivaksi, että mikrobit eivät saa siitä tarvitsemaansa vettä. (Ahokas ja Hautala 2011)

Suomessa vilja joudutaan yleensä korjaamaan lyhyen kasvukauden ja kostean syksyn takia niin kosteana, että se ei säily pitkään käsittelemättä. Usein puintikosteus on yli 20 % (w.b.), mutta se voi vaihdella alle 14 % ja jopa 40 % välillä. Vuosina 1982 - 1988 vilja puitiin Suomessa keskimäärin kosteuden ollessa 27 % (Peltola 1989). Eviran viljasadon laatuseurannassa viljelijät ovat ilmoittaneet keskimääräisiksi puintikosteuksiksi vuosina 2008 - 2012 vehnällä 17 – 27 %, rukiilla 18 – 25 %, ohralla 16 – 22 % ja kauralla 16 – 21 % (Elina Sieviläinen, erikoistutkija, Evira, sähköpostiviesti kirjoittajalle 1.3.2013).

Tuore vilja tulee käsitellä siten, että vilja säilyy varastoinnin ajan ja on elintarvikkeeksi, rehuksi tai siemeneksi kelpaavaa ja hyvälaatuista, kun se otetaan käyttöön. Vilja säilyy varastossa pitkään, kun sen kosteuspitoisuus on 14 % (w.b.). Samana talvena käytettynä vilja säilyy, kun kosteus on 16 - 18 %. Säilymisen varmistamiseksi vilja kuitenkin useimmiten kuivataan 14 %:n kosteuteen. Kuvassa 2. on esitetty miten kosteus ja lämpötila vaikuttavat viljan säilymiseen.



Kuva 2. Kosteuden vaikutus viljan säilyvyyteen. (Ahokas ja Hautala 2011).

Tuore puintikostea vilja alkaa pilaantua hyvin nopeasti, etenkin lämpimissä oloissa etenkin, jolloin hengitys ja entsyymitoiminta tuottavat lämpöä viljaan. Kuivauksessa käytetään Suomessa nykyisin pääasiassa lämminilmakuivausta, jolloin kuivauksen onnistuminen ei ole yhtä säästä riippuvaista kuin kylmäilmakuivauksessa. Lämminilmakuivauksessa lämmitettyä ilmaa puhalletaan viljakerroksen läpi, jolloin jyvissä oleva kosteus siirtyy poistuvaan

ilmaan. Kuivauksen aikana viljaa kierrätetään kuivurissa, jotta kuivuminen olisi tasaista ja kosteus ehtii siirtyä jyvän sisältä pinnalle.

2.1.2. Kuivauksen teoria

Kuivaus perustuu veden haihtumiseen kostealta pinnalta. Vesi haihtuu pinnalta, jos ympäröivä ilma on riittävän kuivaa. Kosteus ilmassa ja kuivattavassa materiaalissa pyrkii tasapainoon, jolloin kosteasta materiaalista vettä siirtyy ympäröivään ilmaan niin kauan kunnes tasapainokosteus on saavutettu. Kuivauksessa tasapainokosteutta ei yleensä saavuteta, koska kostea ilma puhalletaan pois viljan ympäriltä. Tasapainokosteus riippuu lämpötilasta siten, että lämpimämmässä ilmassa tasapainokosteus on alempi. Näin ollen vesi haihtuu helpommin, kun kuivauksessa käytetään lämmintä ilmaa. (Peltola 1997, Ahokas ja Hautala 2011)

Vilja kuivuu aluksi nopeasti, koska jyvän pinta on kostea ja jyvä kuivuu koko jyvän pinta-alalta. Tämä vaihe on lyhyt, viljan kuivuminen alkaa hidastua, kun viljan kosteus on alle 30 % (w.b.). Kuivuminen hidastuu jyvän kuivuessa, koska kosteuden täytyy siirtyä jyvän sisältä jyvän pinnalle, jotta kosteus voi haihtua.

Ideaalikuivurissa viljan kuivaukseen tarvitaan 2500 kJ yhden vesikilon haihduttamiseen. Todellinen energiankulutus on kuitenkin noin kaksinkertainen, koska energiaa menee hukkaan erilaisina lämpöhäviöinä, häviöt on esitetty taulukossa 1. (Ahokas ja Koivisto 1983). Lisäksi energiaa tarvitaan kostean ilman poistamiseen (puhallukseen) viljan seasta sekä viljan lämmittämiseen (Peltola 1997).

Taulukko 1. Viljan kuivauksen energiatase. (Ahokas ja Koivisto 1983)

Kuivuriin syötetty energia	100 %
Uunin häviöt	15-20 %
Lämpöhäviöt ympäristöön	5-15 %
Viljan lämpeneminen	5-10 %
Poistoilman lämpeneminen	25 %
Veden haihtumislämpö	40-50 %

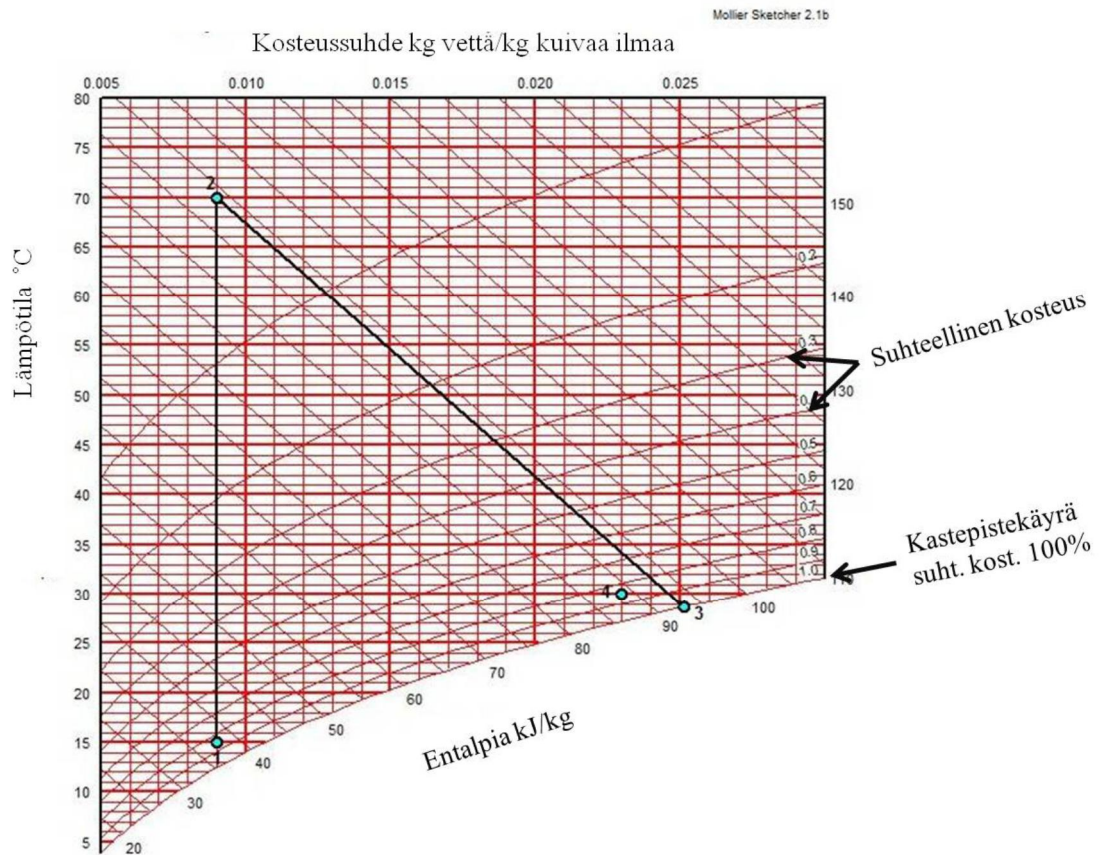
2.1.3. Kuivaukseen vaikuttavat tekijät

Kuivumisnopeus riippuu kuivausolosuhteista. Ulkoisia olosuhteita ovat: ulkoilman kosteus ja lämpötila, viljan kosteus ja hehtolitraino, viljalaji.

Viljankosteus määrää viljasta haihdutettavan veden määrän. Tämän vuoksi vilja pyritään korjaamaan mahdollisimman kuivana. Vilja kuivuu aktiivisesti n. 35 %:ksi. Tämän jälkeen kuivuminen riippuu säästä. Viljan kosteus vaihtelee suuresti myös vuorokauden ajan mukaan, syksyllä puintiaikaa rajoittaa lämpötilan vaihtelu mikä aiheuttaa kasteen eli kosteuden tiivistymisen kasvustoon. Puinnille optimaalisia tunteja (ilman suhteellinen kosteus alle 70 %) on päivässä usein vain 2-3. (Ahokas ja Koivisto 1983) Viljan kosteus vaihtelee tyypillisen poutaisen vuorokauden aikana 6 - 8 % -yksikköä (Järvenpää ja Laurola 1987, ref. Peltola 1989) Työtehoseuran kenttäkokeissa viljan kosteuden vuorokausivaihteluksi mitattiin keskimäärin 7 - 12 % -yksikköä (Peltola 1985).

Kuivauksen edetessä viljan kuivuminen hidastuu, minkä vuoksi viljan kuivaaminen kuivemmaksi vaatii kuivattua vesikiloa kohti enemmän energiaa. Sää vaikuttaa merkittävästi kuivauksen energiankulutukseen, esimerkiksi viiden asteen lämpötilan nousu vähentää energiankulutusta n. 9 %. (Ahokas ja Koivisto 1983) Huonokaan sää ei kuitenkaan estä kuivausta lämminilmakuivuria käytettäessä. Energiansäästämiseksi kuivaus tulisikin pyrkiä tekemään hyvällä säällä päivällä lämpötilan ollessa korkeimmillaan ja ilman suhteellisen kosteuden pienimmillään. Aikaisia lajikkeita käytettäessä päästään viljankorjuuseen aiemmin, kun korjuu- ja kuivausolosuhteet ovat vielä paremmat kuin myöhemmin syksyllä.

Myös ilmankosteus vaikuttaa kuivumiseen, mitä kuivempaa ilma on sitä enemmän siihen voi siirtyä kosteutta jyvistä. Tämä voidaan havaita Mollier-diagrammista kuvassa 3. Diagrammista nähdään kuinka paljon vettä on sitoutunut ilmaan, kun tiedetään ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus.

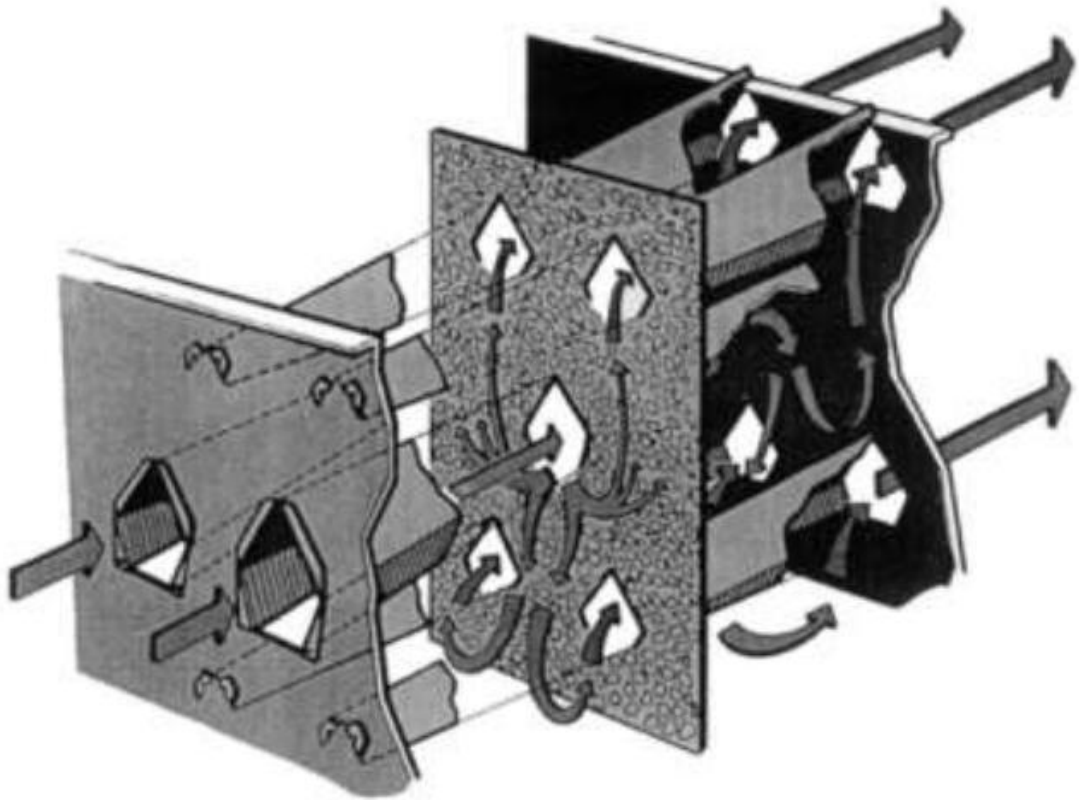


Kuva 3. Mollier-diagrammi. Diagrammista nähdään kuinka paljon vettä on sitoutunut ilmaan, kun tiedetään ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. (Ahokas ja Hautala 2011)

2.2. Kuivuri ja sen energiankäyttö

2.2.1. Viljaa kierrättävä lämminilmakuivuri

Tutkimuksen kohteena on viljaa kierrättävä sekavirtaustyyppinen lämminilmaeräkuivuri. Tämä kuivurityyppi on nykyisin yleisin kuivurityyppi Suomessa. Kuivurin alaosassa on kuivauskennoja, joissa on tulo- ja poistoilmaharjoja joiden kautta kuivausilma kulkee kuivurin läpi. (kuva 4).



Kuva 4. Kuivauskennon rakenne. Ilma tulee kennoon tuloilmaharjoja pitkin, kulkee viljan läpi ja poistuu poistoilmaharjojen kautta. (Giner ja Bruce 1998)

Kuivurin yläosassa on varastokennoja, joissa kuivausilma ei kulje. Varastokennoissa viljassa oleva kosteus siirtyy lähemmäksi pintaa, jolloin viljan joutuessa takaisin kuivauskennoon viljan pinnalla oleva vesi haihtuu ja vilja kuivuu. (Peltola 1997).

2.2.2. Muut kuivurityypit

Kuivurityypit jaotellaan kylmä- ja lämminilmakuivureihin sekä erä- ja jatkuvatoimisiin kuivureihin. Viljaa kierrättävän lämminilmaeräkuivurin lisäksi muita kuivurityyppejä ovat kylmäilmakuivuri, kuivaava varastosilo ja pakastekuivuri.

Viime vuosina kuivaavien varastosilojen käyttö on yleistynyt Suomessa. Niitä käytetään energian ja kustannusten säästämiseksi sekä puskurivarastoina. Puskurivarastoa käytettäessä voidaan hyvällä säällä puida paljon viljaa ja

varastoida se väliaikaisesti kuivaavaan varastosiiloon. Tällöin lämminilmakuivurin kapasiteetti ei rajoita korjuuketjun kapasiteettia.

2.2.3. Kuivurin säätömahdollisuudet

Tutkimuksen kohteena olevassa kuivurissa voidaan säätää kuivausilman määrää ja lämpötilaa sekä viljan kiertonopeutta kuivurissa. Säätöjä voidaan tehdä kuivauksen aikana, mutta tässä tutkimuksessa säädöt tehdään kuivauksen alkaessa. Kierron yhteydessä viljaa puhdistetaan puhaltamalla, jolloin viljasta poistuu pölyä ja roskia.

Suuremmalla lämmöllä kuivuminen on nopeampaa. Liian suuri lämpötila voi kuitenkin vaurioittaa jyvää. Erityisesti jyvien itävyys kärsii suuria kuivauslämpötiloja käytettäessä, varsinkin jos viljan alkukosteus on suuri. Suomalan ja Peltolan tutkimuksessa (1987) 70 °C lämpötilassa kuivausvaurioiden esiintyminen on vähäistä. 90 °C lämpötilassa kuivausvaurioita syntyy melko paljon, mikäli vilja on alussa kosteaa (n. 24 %), kuivemmalla viljalla (19 %) kuivausvaurioiden esiintyminen oli vähäisempää. 120 °C kuivauksessa kuivausvaurioita esiintyi kaikissa tapauksissa hyvin paljon. Rehuviljan laatu ei heikentynyt merkittävästi edes 120 asteella kuivattaessa (Peltola 1987).

Viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa on turvallista käyttää jopa 80 asteen kuivauslämpötilaa, viljan itävyyden heikkenemättä, kun käytetään nopeaa viljan kiertoa eli noin yksi kierros tunnissa. Nopea kierto varmistaa viljan tasaisen kuivumisen ja vähentää kuivausvaurioiden riskiä. (Peltola 1987)

Kuivurin säädöillä voidaan vaikuttaa kuivauksen energiankulutukseen. Kuivumisen nopeuttaminen on hyödyllisempää nostamalla lämpötilaa kuin lisäämällä ilmamäärää. Kosteudella on enemmän aikaa siirtyä viljasta ilmaan, kun lämpötilaa kasvatetaan pienentämällä ilmavirtausta. 5-10 asteen lämpötilan nostamisella energiansäätö ei ollut vielä havaittavissa. Hyvin eristetyssä

kuivurissa kymmenen asteen lämpötilan nostolla arvioitiin energiansäästöksi 5%. (Ahokas ja Koivisto 1983)

Lämpötilan nostamisella voidaan saavuttaa hyvin suuria vedenhaidutuksen lisäyksiä. Työtehoseuran tutkimuksissa lämpötilan nostolla 70 °C:sta 90 °C:een saavutettiin 40 %:n vedenhaidutuksenlisäys ja lämpötilan nosto 120 asteeseen lisäsi vedenhaidutusta lähes 100 %. Vedenhaidutuksen lisäys oli selvintä viljan ollessa jo lähes varastointikelpoista. Energiansäästöiksi tutkimuksissa saatiin eristetyllä kuivurilla 90 °C:lla 5 - 10 % ja 120 °C:lla 10 - 20 %. Eristämättömällä kuivurilla myös lämpöhäviöt kasvavat, joten tällöin energiansäästö pienenee. (Peltola 1987)

Myös automatiikalla voidaan säästää energiaa. Kuivauksen alussa ilmamäärän tulisi olla suuri. Kuivauksen edetessä kuivumisnopeus pienenee, jolloin pienempi ilmamäärä säästäisi energiaa. Viljan kosteuden laskiessa alle 20 %:n ilmansäätöautomatiikan avulla ilmamäärää voidaan kuristaa ja taloudellisuus paranisi 5 %, myös viljan kiertonopeutta hidastamalla kuivauksen loppuvaiheessa taloudellisuus paranee n. 10 %. Tällöin kuitenkin viljan lämpötila nousee ja kuivausvaurion riski kasvaa. (Peltola 1987) Pelkkä viljan kierron hidastaminen ei kuitenkaan ole kannattavaa kuivauksen loppuvaiheessa, vaan samalla pitää kuivausilman virtausta hidastaa (Peltola 1988). Kuivauksen loppuvaiheessa (viljan kosteuden ollessa alle 20 %) kuivurin hienosäädöllä saavutetaan 10 – 15 % hetkellinen energiansäästö. Samalla kuivauskapasiteetti kasvaa. (Peltola 1988)

Käyttämällä keskitettyä viljan vastaanottoa ja viljan kuivausta suurissa jatkuvatoimisissa kuivureissa energiaa voitaisiin säästää jopa 60 % vuosien 1982 - 1988 tasoon verrattuna (Peltola 1989).

Viljan hidas kiertonopeus aiheuttaa epätasaista kuivumista ja myös vioitusriski kasvaa. Viljan kiertonopeudeksi on suositeltu kierros kahdessa tunnissa. Nopeamman kiertonopeuden on todettu hidastavan viljan lämpenemistä kuivauksen alussa, mikä heikentää kuivauksen vedenhaidutuskykyä. (Peltola 1985)

Viljan kutistumisen vuoksi viljan massavirtaus lisääntyy ja viljan tasaantumisaika, jolloin kosteus siirtyy jyvän pintaan, lyhenee kuivauksen edetessä. Tasaantumisaika tulisi kuitenkin kasvaa kuivauksen loppuvaiheessa, muuten kuivauksen taloudellisuus heikkenee. Toisaalta viljan kierrätyksen hidastaminen johtaa kuivausvaiheen pitenemiseen, jolloin viljan lämpötila saattaa nousta ja vioitusriski kasvaa. (Peltola 1997)

2.2.4 Kuivurin energiankulutus ja säästömahdollisuudet

Aiemmin on todettu kuivauksessa kuluvan energiaa vähintään 2500 kJ haihdutettua vesikiloa kohden. Käytännössä energiaa kuluu enemmän ja tavallisesti haihdutettua vesikiloa kohden kuluu 4000 - 6000 kJ (Ahokas ja Koivisto 1983). Ylimääräinen energia menee erilaisiin häviöihin.

Häviöitä ovat poistoilmahäviöt, jäähdytysilmahäviöt, säteilyhäviöt ja kuivuriuunin häviöt (Piltti 1979). Häviöiden jakauma on esitetty taulukossa 1. Kuivaukseen tarvittavan energian lisäksi tarvitaan sähköenergiaa kuljettimien, syöttölaitteiden, puhaltimien ja muiden sähkölaitteiden toimintaan. Sähköä kuluu arviolta 0,08 kWh haihdutettua vesikiloa kohden (Piltti 1979). Vuosina 1982 - 1988 sähkön kulutus oli n. 5 % (49000 MWh vuodessa) kuivauksen energian kulutuksesta Suomessa (Peltola 1989). Tämä on samaa suuruusluokkaa (5 – 7 %) kuin Piltin (1979) tutkimuksessa, jos vesikilon haihduttamiseen arvioidaan kuluvan 4000 - 6000 kJ energiaa.

Helpoin tapa säästää energiaa on minimoida kuivaustarve. Kuivaustarve voidaan minimoida puimalla vilja mahdollisimman hyvissä olosuhteissa, käyttämällä sopivia riittävän aikaisia lajikkeita ja välttämällä ylikuivausta.

Todellisen ja teoreettisen energiankulutuksen välillä on suuri ero ja sen vuoksi energiansäästömahdollisuudet ovat melko suuret. Energiaa voitaisiin säästää huomattavasti melko helposti. Tällöin kuitenkin kuivauskustannukset voisivat nousta enemmän, kuin mikä on säästetyn energian arvo. Tällöin energiansäästö ei ole taloudellisessa mielessä järkevää. Energiansäästöä

tulee aina ottaa huomioon kustannustehokkuus. On käytettävä sellaisia toimenpiteitä, joilla saavutetaan mahdollisimman suuri hyöty mahdollisimman pienillä kustannuksilla.

Poistoilmahäviöitä voitaisiin pienentää ottamalla poistoilman lämpöä talteen lämmönvaihtimella tai lämpöpumpulla ja käyttämällä sitä kuivausilman esilämmitykseen. Ongelmina tässä ovat poistoilman kosteus ja roskaisuus sekä energiansäästöön verrattuna suuret kustannukset. (Piltti 1979) Lämmönvaihtimella voitaisiin säästää energiaa 15 - 25 %. Kylmällä ilmalla säästö on suurempi, koska lämmönvaihtimen teho riippuu lämpötilaerosta. (Ahokas ja Koivisto 1983)

Viljan korjuukautena vuorokaudenaikaiset lämpötilavaihtelut ovat usein suuria. Yöllä voi helposti olla kymmenen astetta kylmempää kuin päivällä. Kaksiliekkipolttimen avulla kuivausilma voidaan pitää vakiona myös yöllä lisäämällä öljynsyöttöä. Tällöin voidaan kuivausaikaa lyhentää, kun kuivauskapasiteetti pysyy samana. Öljynsyötön lisäys yöllä ei vaikuta merkittävästi kokonaisöljynkulutukseen, koska kuivausaika lyhenee. (Peltola 1988) Ulkoilman lämpötila kuitenkin vaikuttaa merkittävästi energiankulutukseen, joten kuivaus tulisi suorittaa mahdollisimman lämpimällä säällä.

Viljan jäähdytysvaiheessa energiaa menee hukkaan, kun viljaan sitoutunut lämpö poistuu jäähdytysilman mukana. Osa tästä energiasta tulee kuitenkin hyötykäyttöön, sillä kosteutta sitoutuu myös jäähdytysvaiheen aikana (0,5 - 1,0 % -yksikköä). Jäähdytysilman lämpöä voitaisiin poistoilman tapaan käyttää kuivausilman esilämmitykseen, varsinkin jos kyseessä on jatkuvatoiminen kuivuri. (Piltti 1979)

Lämpöhäviöitä voidaan pienentää helposti eristämällä kuivuri. Eristämisellä saavutetaan keskimäärin 15 %:n energiansäästö. Kuivurin eristäminen on edullinen ja helppo tapa säästää energiaa. Eristämisen yhteydessä myös kuivurin kapasiteetti nousee, kun kuivauslämpötila nousee. (TTS 11/1989)

Kuivausmalleja ja simulaattoreita on kehitetty 1960 luvulta alkaen. Mallien avulla on lähinnä mitoitettu korjuuketjuja tai laskettu kuivauksen kustannuksia. (Loewer et al.1994).

Kuivurissa voidaan säästää energiaa 10 – 15 % kuivurin eristämällä, 5 – 10 % ylikuivauksen välttämällä, 5 – 10 % nostamalla kuivausilman lämpö 70 - 80 asteeseen ja asettamalla viljan kierto nopeaksi, 0 – 5 % huoltamalla poltin vuosittain. Lisäksi voitaisiin vielä säästää 10 % rakentamalla erillinen jäähdytys­siilo, jossa lämmin vilja jäähdytettäisiin pienellä ilmamäärällä (40 - 80 m³/h viljatonni). Näillä toimilla voitaisiin yhteensä säästää 30 % energiaa. (Peltola 1987)

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Työn tavoitteena oli selvittää miten kuivurin säädöt vaikuttavat eri olosuhteissa viljankuivauksen energiatehokkuuteen ja miten saavutettiin pienin energiankulutus. Työ tehtiin simulointimallin avulla. Lisäksi selvitettiin simulointimallin toimivuus vertaamalla sitä kokeellisesti saatuihin energiankulutuslukuihin Viikin koetilan kuivurilla. Tutkimus perustui kuivauksen teorian tutkimiseen ja energiansäästömahdollisuuksien kartoittamiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli:

1. Tutkia simuloinnin avulla millä säädöillä eri olosuhteissa saavutetaan paras energiatehokkuus
2. Testata viljankuivaussimulaattorin toiminta.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1. Tutkimuksen esittely

Tutkimuksessa selvitettiin miten viljankuivauksen energiatehokkuutta voitaisiin parantaa eri olosuhteissa säätämällä kuivurin toimintaa. Kuivurin säätöjä muutettaessa muuttuu usein myös kuivumisnopeus ja kuivauskapasiteetti. Energiatehokkuutta tarkastellessa tuleekin ottaa huomioon, että kapasiteetin täytyy pysyä riittävän suurena. Tutkimuksessa kuivausta simuloidaan tietokoneohjelmalla, jolloin teoreettisia koekuivauksia voidaan tehdä melko suuri määrä pienillä kustannuksilla. Todellisiin koekuivauksiin verrattuna simulaattorin käyttö on nopeaa ja helppoa. Simulaattorilla tehdään koekuivauksia eri olosuhteissa ja säädöillä. Näin voidaan selvittää miten ja kuinka paljon olosuhteet ja säädöt vaikuttavat kuivauksen energian kulutukseen eri tilanteissa. Koekuivausten antamia tuloksia verrataan Viikin koekuivurin todellisiin kuivaustuloksiin sekä aiempiin viljankuivauksen energiansäästöä käsitteleviin tutkimuksiin. Tulosten ollessa riittävän samankaltaisia, voidaan todeta simulaattorin ainakin suhteellisesti toimivan. Tällöin voidaan etsiä säädöt joilla saavutetaan paras energiatehokkuus.

4.2. Simulaattorin esittely

Simulaattori on tehty MatLab-ohjelmalla. Simulaattorin on tehnyt MMT Johannes Tiusanen. Simulaattorissa viljankuivumisprosessia on yksinkertaistettu siten, että kuivumisen simulointi on mahdollista käytössä olevilla tavallisilla tietokoneilla ja ohjelmilla. Simulaattorissa on graafinen käyttöliittymä (kuva 5), joten sen käyttö on helppoa. Käyttäminen kuitenkin vaatii MatLab-ohjelman. Simuloidessa valitaan viljan alkukosteus sekä haluttu loppukosteus (w.b.), muuttujille (viljan tiheys, ulkoilman lämpötila, ulkoilman suhteellinen kosteus, kuivausilman lämpötila, kuivausilmamäärä) valitaan arvot. Lisäksi annetaan kuivurin mitat (kuivauskennon korkeus, pinta-ala ja kuivauskennojen lukumäärä sekä yläsäiliön korkeus), kuivausaika voidaan rajoittaa halutuksi. Lähtöarvojen antamisen jälkeen kuivaussimulaattori voidaan

ajaa painamalla "Kuivaa"-nappia. Laskennan jälkeen näkyville tulee kuivaukseen kulunut aika, kuivausenergia yhteensä ja tonnia kohden sekä energiahäviöt.

Kuivuri_enpos

Alkukosteus w.b. %	24	Kuivausaika	xxx h	xxx min
Tavoitekosteus w.b. %	14	Kuivausenergia	xxx kWh	xxx kWh / tn
Suurin loppukosteus %	xxx	Häviöt	xxx kWh	
Kutistuma %	xxx			

700	Viljan tiheys (kg/m ³)
15	Kylmän ulkoilman lämpötila (degC)
50	Kylmän ulkoilman RH (%)
10	Ajoaika max (h)
70 - 70	Lämpötila (degC)
xxx - xxx	Uunin teho (kW)
2000 - 2000	Ilmamäärä (m ³ /h /vilja-m ³)
xxx - xxx	Puhallin (m ³ /h)
xxx	Mallin dt (sek)
60	Kiertoaika (min)

40	Kennon korkeus (parillinen cm)
6	Kennon pohja-ala (m ²)
3	Kuivauskennoja (harjavälejä tuplasti)
100	Yläsäiliön korkeus (cm)
xxx	Kokonaistilavuus (m ³)
xxx	Koko korkeus (m)
xxx	Kuivauskerroksen vahvuus (cm)

Mallin vesitaseet xxx
 xxx

☒ Elevaattori

Surf

Tiedosto xxx

Kuva 5. Kuivaussimulaattorin graafinen käyttöliittymä. Valkoiseihin kenttiin syötetään lähtöarvot ja kuivurin tiedot.

4.3. Simulointisarja

Simuloimalla tutkittiin olosuhteiden ja säätöjen vaikutusta viljankuivauksen energiatehokkuuteen ja kuivauskapasiteettiin.

Tässä olosuhteilla tarkoitetaan:

- viljan tiheyttä
- viljan kosteutta (w.b.)
- ulkoilman lämpötilaa
- ulkoilman suhteellista kosteutta

Kuivurin säädöillä tarkoitetaan:

- kuivausilman lämpötilaa
- viljamassan kiertoaikaa kuivurissa

- kuivausilman määrää

Simuloinnissa koekuivauksia tehtiin taulukoiden 2 ja 3 mukaisilla arvoilla. Arvot on päätetty todenmukaisten kuivauksessa käytettyjen ja aiemmissa tutkimuksissa käytettyjen arvojen perusteella. Simulointikertoja tehdään riittävä määrä siten että voitiin selvästi nähdä, miten eri olosuhteet ja säädöt vaikuttavat kuivausprosessiin. Samalla saatiin selville eri olosuhde- ja säätövaihtoehtojen vaikutus toisiinsa. Taulukoiden arvoilla simulointeja tehtiin kaikkiaan 114 kappaletta.

Taulukko 2. Simuloinnissa käytettyjen olosuhteiden arvot.

Olosuhteet	Ulkoilman suhteellinen kosteus, %	Ulkoilman lämpötila, °C	Viljan kosteus, % w.b.
Huonot			
1	80	8	22
2	80	13	22
Keskimääräiset			
3	50	13	22
4	50	18	28
5	80	8	16
6	80	18	22
Hyvät			
7	50	13	16
8	50	18	22
9	50	18	16

Simulaattori kertoo kuivausajan sekä käytetyn kokonaisenergiamäärän ja energiamäärän viljatonna kohden. Kokonaisenergiamäärästä lasketaan keskimääräinen vesikiloa kohden kuluva energiamäärä. Kuivausajan perusteella lasketaan kuivauskapasiteetti (vesikiloa/tunti tai viljatonna/tunti). Energiatohokkuuden kannalta vesikiloa/aikayksikkö lienee mielenkiintoisempi yksikkö, käytännön tarkastelussa ollaan useimmiten kiinnostuneita siitä kuinka paljon viljaa voidaan kuivata tietyssä ajassa, tämä on tärkeää esim. kuivurin mitoituksessa tai viljelyn suunnittelussa.

Taulukko 3. Simuloinnissa käytettyjen säätöjen arvot.

Säädöt	Kuivauslämpö, °C	Kiertoaika, min	Ilmamäärä, m ³ /m ³ viljaa /h
1	50	60	800
2	90	60	800
3	50	120	800
4	90	120	800
5	50	60	1200
6	90	60	1200
7	50	90	1200
8	90	90	1200
9	50	120	1200
10	90	120	1200
11	50	60	2000
12	90	60	2000
13	50	90	2000
14	90	90	2000
15	50	120	2000
16	90	120	2000

Simuloinnit tehtiin Viikin koetilan kuivurin mittojen mukaisella kuivurilla. Simulaattorissa ilmaharjojen pinta-alaa ei ollut otettu huomioon. Ilmaharjojen alaksi arvioitiin 20 % kuivauskennojen alasta. Tämän vuoksi, jotta simulaattorin kuivurista saatiin samankaltainen oikean kuivurin kanssa kuivauskennojen pinta-alaa ja yläsäiliön korkeutta muutettiin siten, että kokonaistilavuudet saatiin yhtä suuriksi. Koetilankuivurin mitat olivat: kuivurikennojen pituus oli 1,5 metriä, leveys 1,6 metriä, pinta-ala 2,4 neliömetriä ja korkeus 1,18 metriä. Kuivurikennoja oli neljä kappaletta päällekkäin. Yläsäiliön korkeus oli 2,76 metriä. Simulaattorissa ei ollut otettu huomioon ilmaharjojen vaatimaa tilaa. Tämän vuoksi simulaattorissa kuivauskennojen alaa pienennettiin 20 %, jolloin alaksi tuli 1,92 neliömetriä. Näin ilmaharjojen vaatima tila saatiin helposti mukaan. Tällöin viljamäärä, harjaväli sekä viljan viipymä pysyvät samoina kuin oikeassa kennossa. Yläsäiliön tilavuus pidettiin samana, joten simulaattorissa yläsäiliön korkeutena käytettiin 3,45 metriä. Kuivurin vaipan ala muuttuu hieman, mutta sen vaikutus arvioitiin mitättömäksi.

4.4. Herkkyysanalyysi

Simuloinnissa tehtiin lisäksi herkkyysanalyysi, jossa simulointeja tehtiin muuttamalla yhtä muuttujaa kerrallaan. Näin voidaan helposti selvittää miten merkittävä yksi muuttuja on prosessille. Herkkyysanalyysissä käytetyt arvot on esitetty taulukossa 4. Siitä käy ilmi jokaisen muuttujan vakioitu arvo, jota on käytetty silloin, kun jonkin muun muuttujan vaikutusta prosessiin on haluttu selvittää. Lisäksi ilmenee vaihteluväli, jota kullakin muuttujalla on käytetty sekä askel eli kuinka paljon muuttujan arvoa on muutettu kunkin koeajon jälkeen. Lisäksi ilmenee vielä kuinka monta koeajoa kutakin muuttujaa selvitetäessä on tehty.

Taulukko 4. Herkkyysanalyysissä käytetyt arvot.

Muuttuja	Vakioitu arvo	Herkkyysanalyysin vaihteluväli		Yksikkö	Askel	Koeajoja
Viljan tiheys	700	450	750	kg/m ³	10	31
Viljan kosteus (w.b)	22	15	30	%	1	16
Ulkoilman lämpötila	13	1	25	°C	1	25
Ulkoilman suhteellinen kosteus	60	50	98	%	2	25
Kuivausilman lämpötila	90	50	120	°C	2	36
Viljan kiertoaika	90	60	120	min	5	13
Kuivausilman määrä	2000	800	2600	m ³ /m ³ viljaa /h	100	19

4.5. Simulaattorin vertaaminen kuivurilla tehtyihin mittauksiin

Viikin koetilan kuivurilla tehtyjä kuivauksia verrattiin simuloinnin antamiin tuloksiin. Koekuivaukset suoritettiin syksyllä 2011, jolloin korjuuolosuhteet olivat hyvät. Tämän vuoksi vilja oli jo puitaessa hyvin kuivaa. Tarkasteltaviksi kuivauseriksi valikoitiin sellaiset kuivauserät, joissa olosuhteet ja säädöt pysyivät riittävän hyvin vakioina koko kuivauksen ajan. Tällaisia kuivauseriä

löytyi kuusi kappaletta (kuivauserät 6, 7, 8, 10, 12 ja 14). Koekuivauksissa mitattiin viljaerän painoa alussa ja lopussa, poistunutta vesimäärää, käytettyä energiaa, energiahäviöitä sekä kuivaus- ja poistoilman kosteutta ja lämpötilaa sekä kuivaukseen kulunutta aikaa.

5 TULOKSET

5.1. Tulosten käsittely

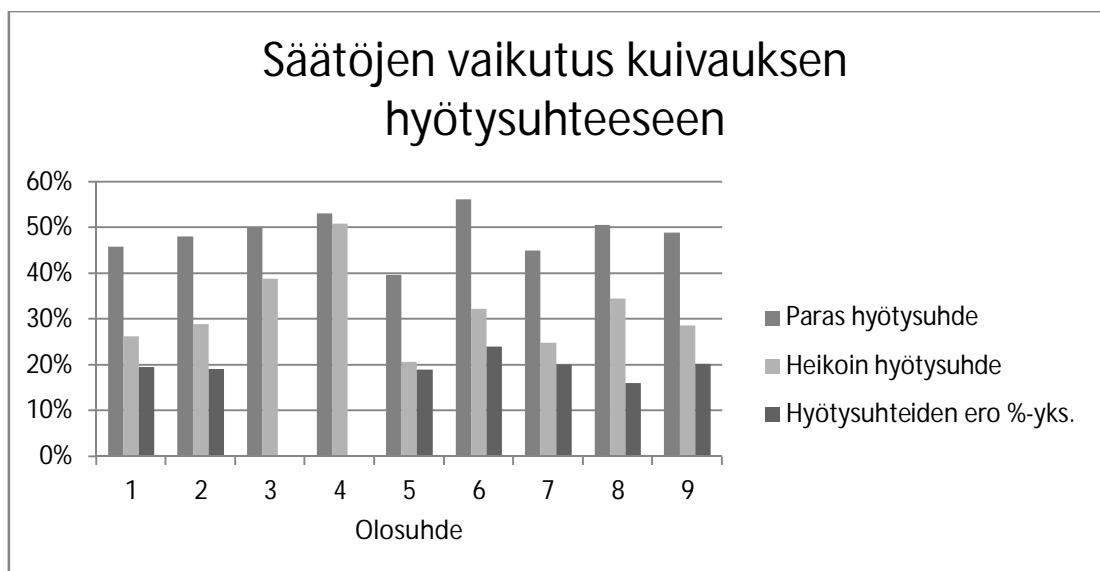
Tutkimuksessa tulokseksi saatiin simulaation avulla saadut energiankulutusarvot erilaisissa olosuhteissa ja eri säädöillä. Näitä tuloksia verrataan Viikin koetilan kuivurilla kokeellisesti saatuihin mittaustuloksiin. Tulosten pitäisi olla riittävän samankaltaisia, jotta voidaan todeta simulaattorin toimivan. Mikäli simulaattori ei vastaa todellisia mittauksia, sitä voidaan yrittää korjata toimivaksi. Mikäli ero on enintään 20 %, voidaan todeta simulaattorin vastaavan riittävällä tarkkuudella todellisia kuivauksia. Kokeellisesti on mitattu vain muutama ajo, jolloin olosuhteet ovat olleet sattumanvaraisia ja lisäksi ne ovat voineet muuttua kuivauksen aikana mikä muuttaa myös kuivauksen energiankulutusta. Simulaattorissa olosuhteet pysyvät vakioina kuivauksen ajan. Käytännössä tällaista tilannetta ei ole ikinä. Kokeellisesti saaduista tuloksista voidaan tämän vuoksi ottaa tarkasteltavaksi vain ne ajot, joilla olosuhteet ovat pysyneet melko tasaisina koko kuivauksen ajan. Eroja tuloksissa voivat aiheuttaa myös simulaattoriin tehtyt kuivausprosessin yksinkertaistukset ja se etteivät käytetyt kaavat täysin vastaa käytännön oloja.

5.2. Hyötysuhteiden vaihtelu

Tulokseksi saatiin koekuivaussarja, jossa kuivauksia saatiin ajettua läpi 114 kappaletta. Joissain tapauksissa, joissa kuivaus kesti säätöjen tai olosuhteiden takia liian kauan ohjelma saattoi kaatua eikä laskenta onnistunut. Koekuivauksissa kuivauksia tehtiin 9 eri olosuhdevaihtoehdolla ja 16 eri säädöillä (taulukot 1 ja 2). Hyötysuhteet on esitetty kuvassa 6. Hyötysuhteet on laskettu kaavalla 1.

$$\eta = 2500 / (E_{\text{kok}} * \frac{3600}{\frac{m_{\text{vesi alussa}}}{m_{\text{vesi lopussa}}}}) \quad (1)$$

Hyötysuhteet vaihtelivat välillä 21 – 56 %. Parhaaksi säädöksi osoittautui säätö 2. Sillä oli paras hyötysuhde jokaisen olosuhteen kohdalla. Säätö 2 tarkoittaa korkeaa kuivauslämpöä ja lyhyttä kiertoaikaa ja ilmamäärää. Huonoimmaksi säädöksi osoittautui säätö 15. Se tarkoittaa pientä kuivauslämpöä, pitkää kiertoaikaa ja suurta ilmamäärää. Kuivauksen pienimmän ja suurimman hyötysuhteen välinen ero vaihteli eri olosuhteissa 16 - 24 prosenttiyksikköä, kun säätöjä muutettiin (kuva 6). Oikeilla säädöillä hyötysuhdetta voidaan parantaa merkittävästi. Olosuhteet eivät vaikuttaneet siihen, mikä säätö oli paras tai heikoin. Parhaan ja heikoimman säädön väliset erot sen sijaan vaihtelivat eri olosuhteissa.



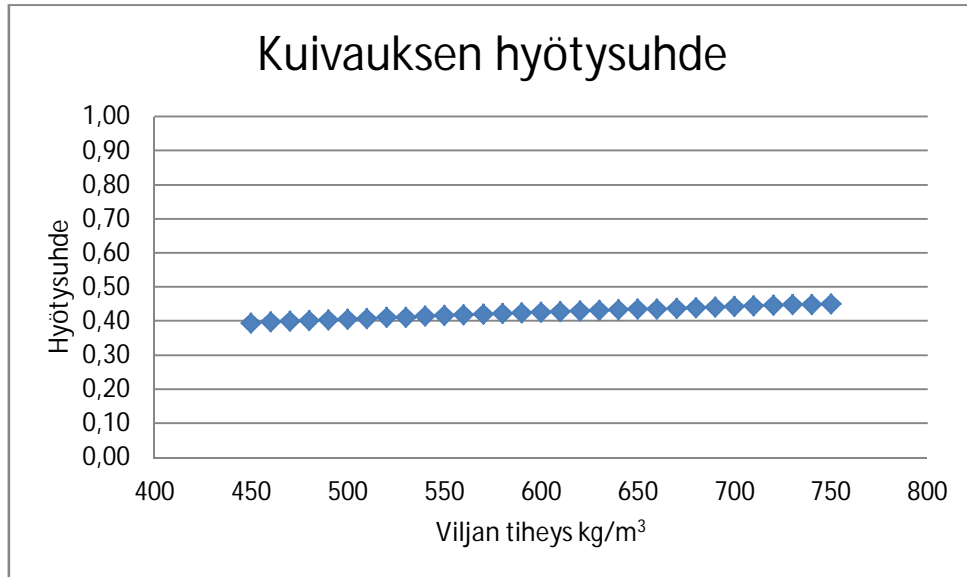
Kuva 6. Simulointikuivausten pienin ja suurin hyötysuhde sekä säätöjen välinen ero eri olosuhteissa. Kuvassa paras hyötysuhde tarkoittaa parasta säätövaihtoehtoa ja heikoin hyötysuhde huonointa säätövaihtoehtoa.

5.3. Herkkyysanalyysi

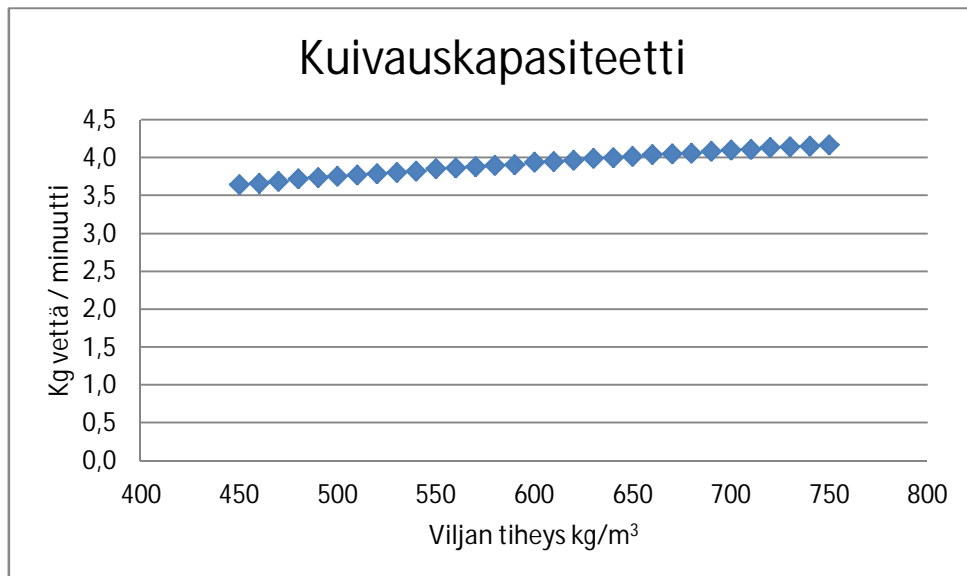
5.3.1. Viljan tiheys

Viljan tiheyden kasvaessa kuivauksen hyötysuhde näyttää kasvavan lievästi. Esimerkiksi kauppakelpoisen ohran tiheys vaihtelee välillä 620 – 750 kg/m³.

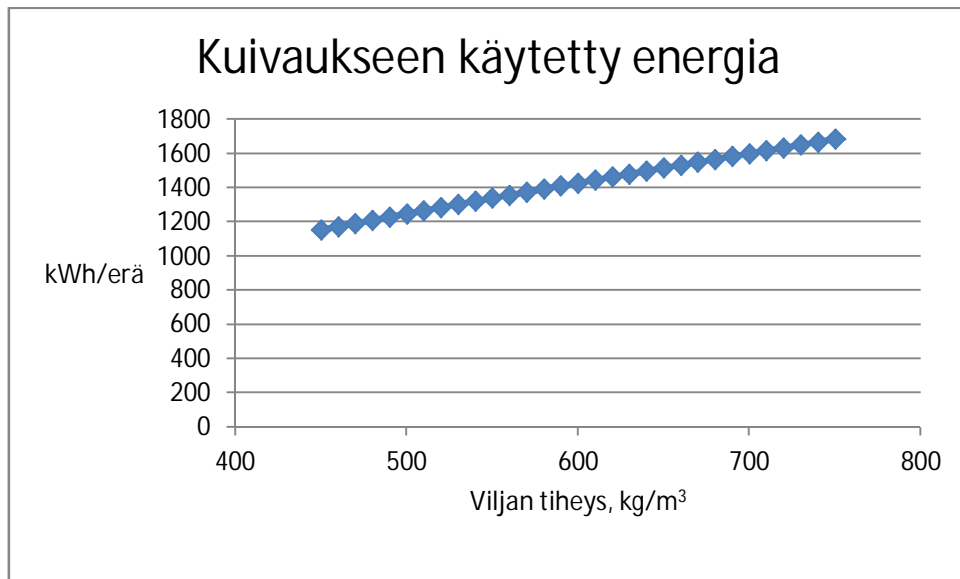
Tällä välillä hyötysuhde kasvaa 43 prosentista 45 prosenttiin (kuva 7). Myös kuivauskapasiteetti kasvaa tiheyden kasvaessa (kuva 8). Samalla välillä kapasiteetti kasvaa 4,0 kilogrammasta vettä minuutissa 4,2 kilogrammaan. Kuivauksessa käytetyn energiankokonaismäärä kasvaa tasaisesti, koska kuivattavaa massaa on enemmän (kuva 9).



Kuva 7. Viljan tiheyden vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



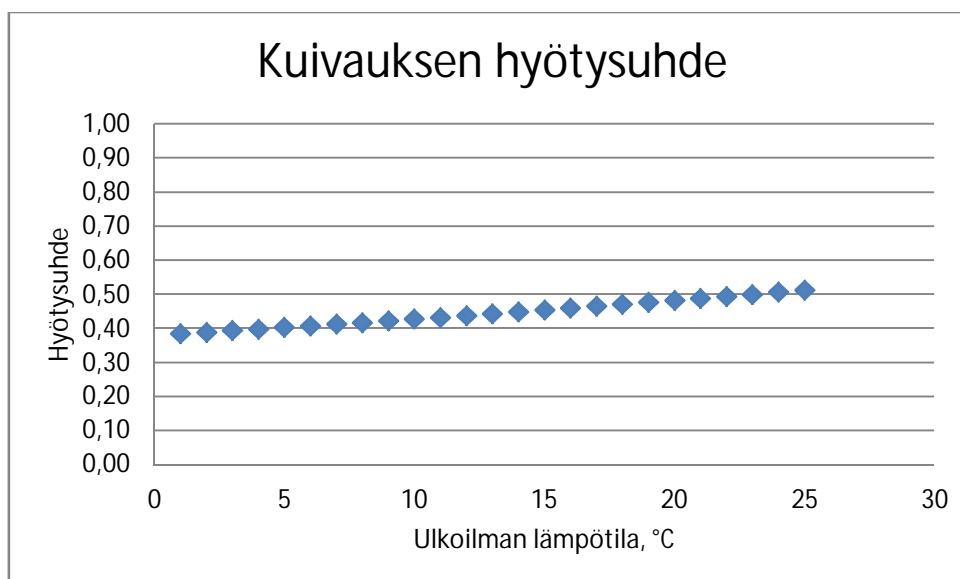
Kuva 8. Viljan tiheyden vaikutus kuivauskapasiteettiin.



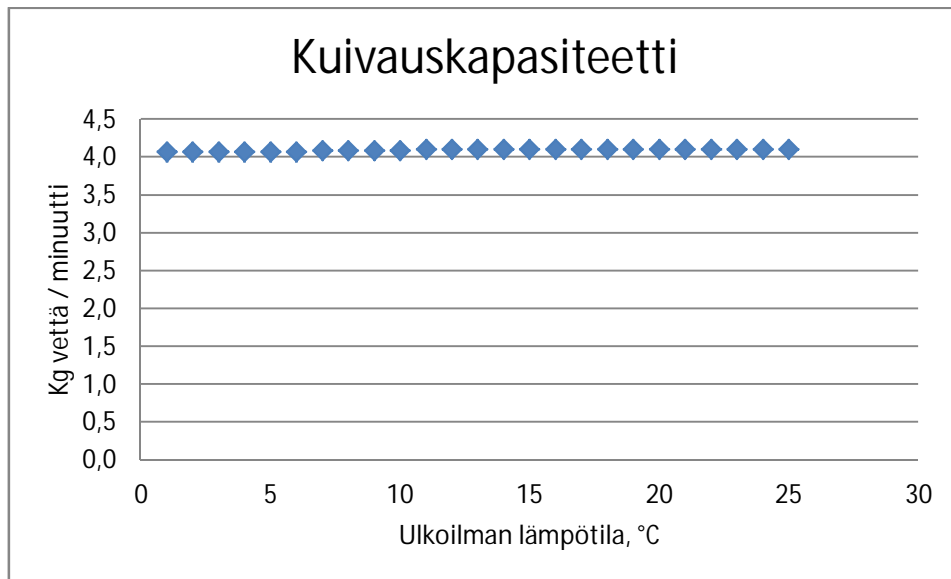
Kuva 9. Kuivaukseen käytetyn energian määrä tiheyden mukaan.

5.3.2. Ulkoilman lämpötila

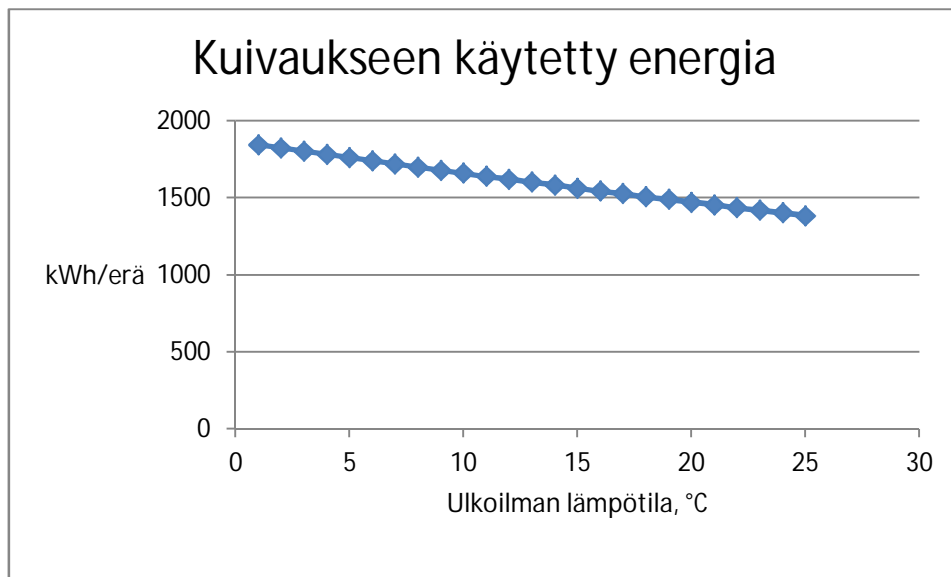
Ulkoilman lämpötila vaikuttaa odotetunlaisesti hyötysuhteeseen. Hyötysuhde kasvaa tasaisesti lämpötilan kasvaessa (kuva 10). Hyötysuhteen paraneminen johtuu, siitä että ilmaa ei tarvitse lämmittää niin paljoa. Kuivauskapasiteetti (kuvassa 11) pysyy samana, koska kuivausilman lämpötila pysyy myös vakiona ulkoilman lämpötilan muuttuessa. Ulkolämpötilan vaikutus kuivauksen energiansäästöön on helpoiten havaittavissa kuvasta 12. Kuivauserän energian kulutus vaihtelee lämpötilan mukaan n. välillä 1400 – 1800 kWh.



Kuva 10. Ulkoilman lämpötilan vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



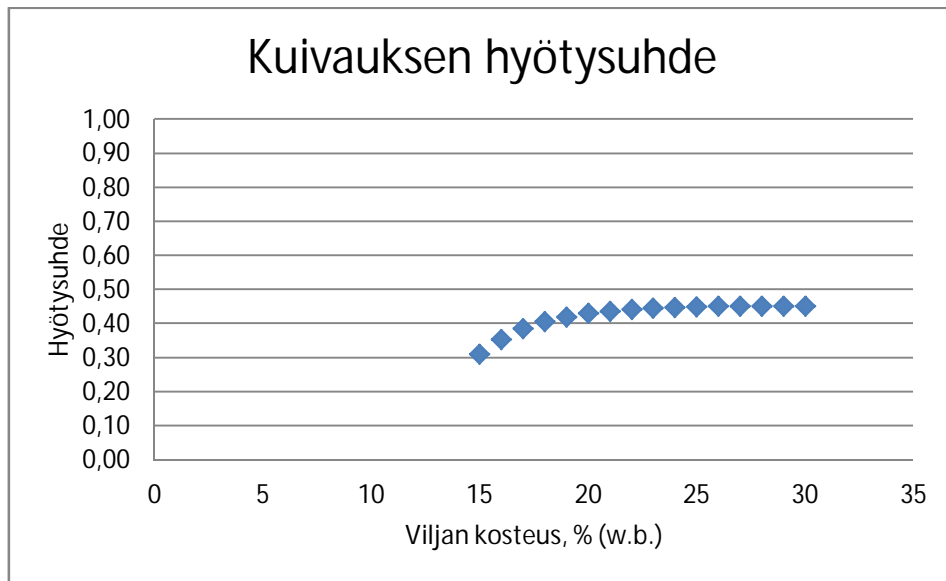
Kuva 11. Ulkoilman lämpötilän vaikutus kuivauskapasiteettiin.



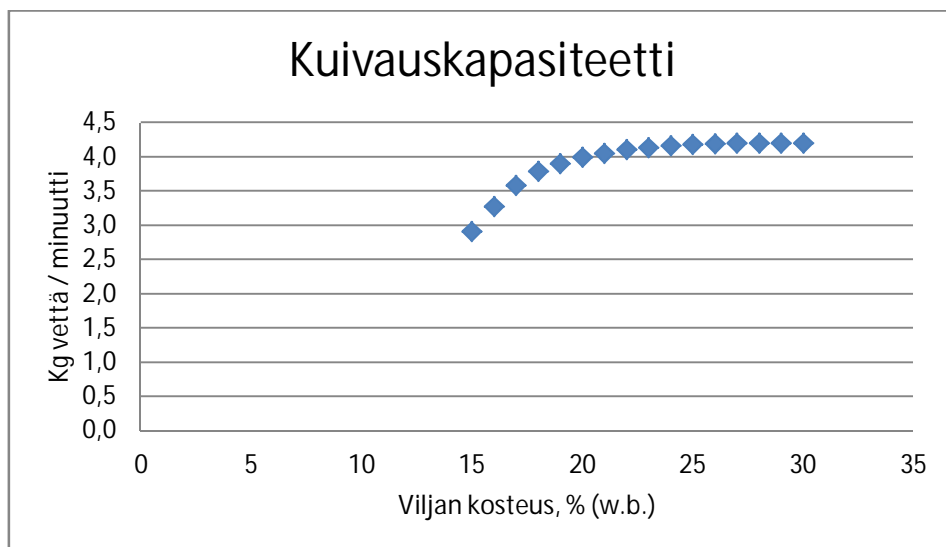
Kuva 12. Kuivaukseen käytetyn energian määrä ulkoilman lämpötilan mukaan.

5.3.3. Viljan kosteus

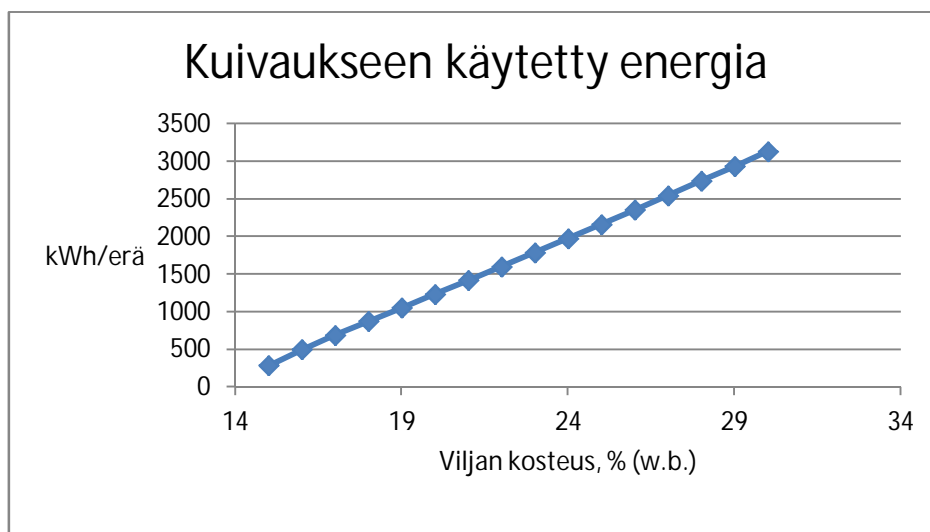
Viljan kosteuden vaikutus hyötysuhteeseen ja kuivauskapasiteettiin on tasaista viljan kosteuden ollessa välillä 20 – 30 % (kuvat 13 ja 14). Kuivemmalla viljalla hyötysuhde ja kuivauskapasiteetti heikkenevät jyrkästi (kuvat 13 ja 14). Tämä oli odotettua, sillä kuivauksen tiedetään hidastuvan kuivauksen edetessä. Hyötysuhteen ja kuivauskapasiteetin paranemisesta huolimatta kuivauserän energiankulutus kasvaa jyrkästi kun joudutaan kuivaamaan kosteampaa viljaa (kuva 15). Tämä johtuu siitä, että haihdutettavan veden määrä on suurempi.



Kuva 13. Viljan kosteuden vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



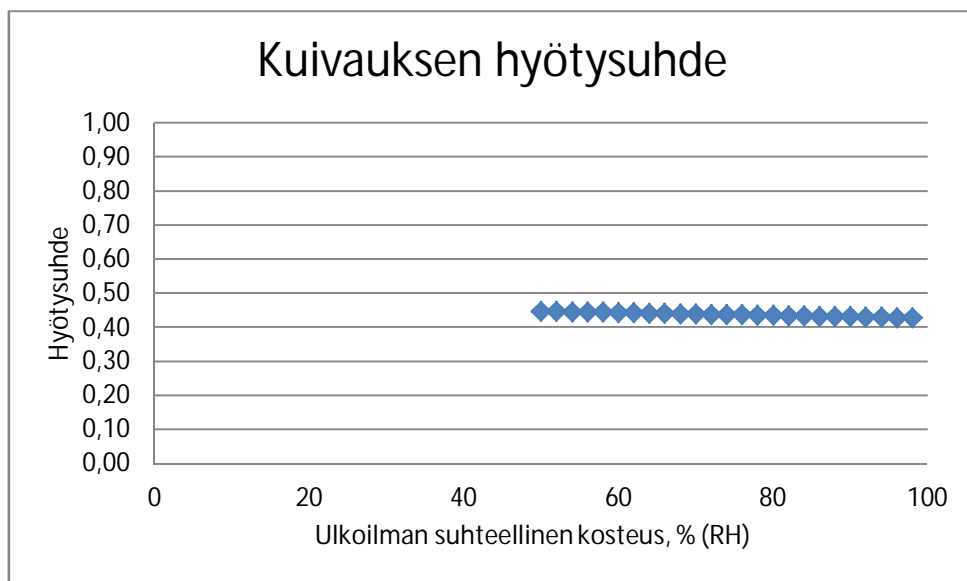
Kuva 14. Viljan kosteuden vaikutus kuivauskapasiteettiin.



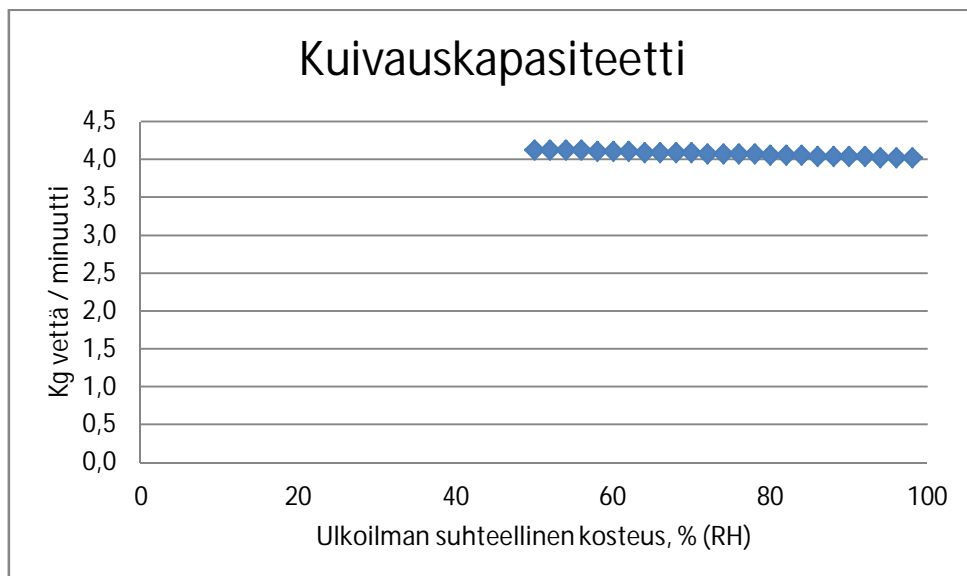
Kuva 15. Kuivaukseen käytetyn energian määrä viljan kosteuden mukaan.

5.3.4. Ulkoilman suhteellinen kosteus

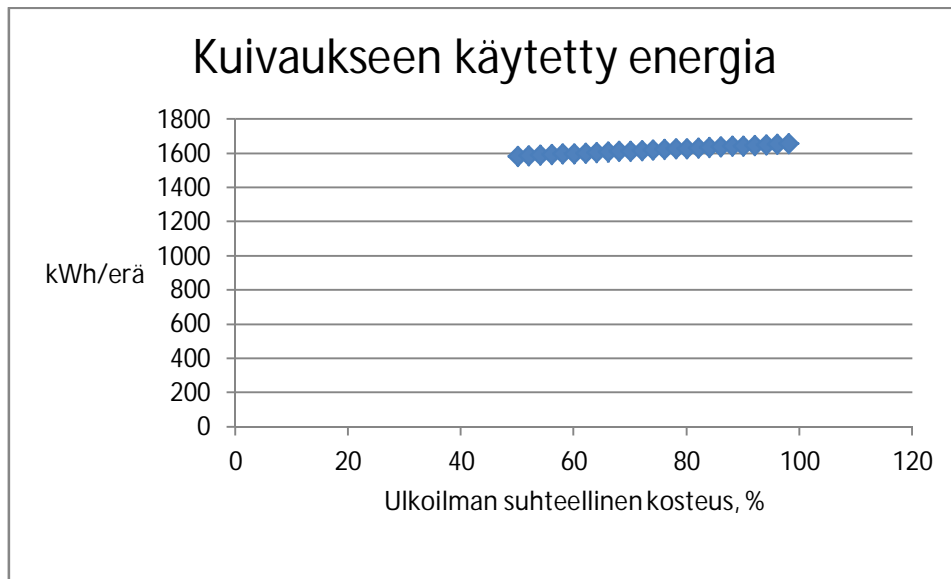
Ulkoilman suhteellisella kosteudella ei näytä olevan juuri vaikutusta hyötysuhteeseen eikä kuivauskapasiteettiin (kuvat 16 ja 17). Tämä johtuu siitä, että lämminilmakuivauksessa ilmaa lämmitetään joka tapauksessa niin paljon ettei ulkoilman kosteudella ole merkitystä. Lämmin kuivausilma pystyy sitomaan paljon enemmän vettä ja sen suhteellinen kosteus on pieni, vaikka lämmittämättömän ulkoilman suhteellinen kosteus olisi suuri. Ulkoilman suhteellisella kosteudella ei ole myöskään juurikaan vaikutusta kuivauserän energiankulutukseen (kuva 18).



Kuva 16. Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



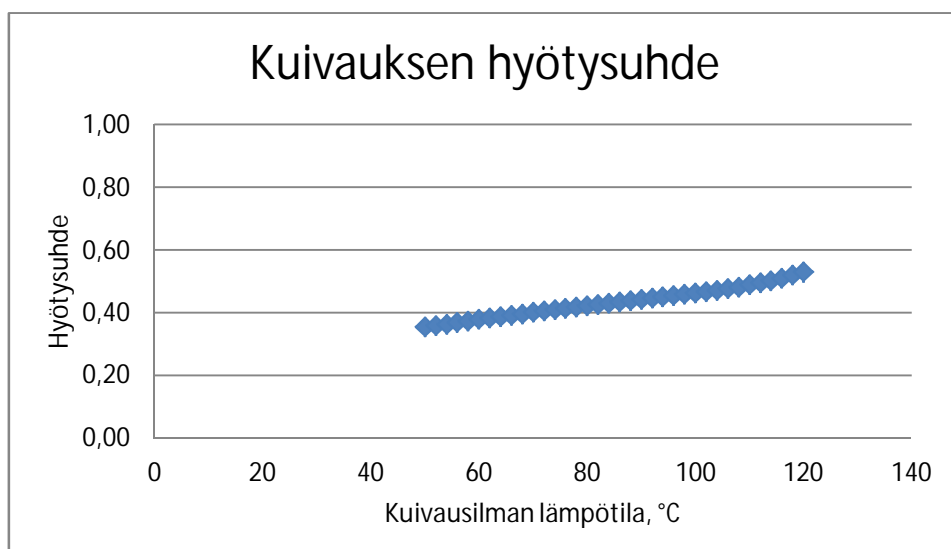
Kuva 17. Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutus kuivauskapasiteettiin.



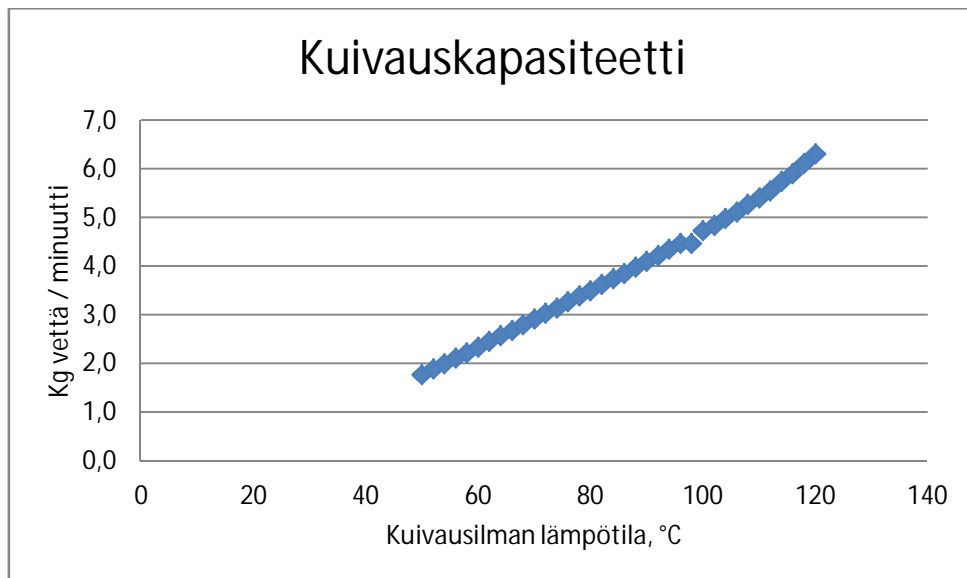
Kuva 18. Kuivaukseen käytetyn energian määrä ulkoilman suhteellisen kosteuden mukaan.

5.3.5. Kuivausilman lämpötila

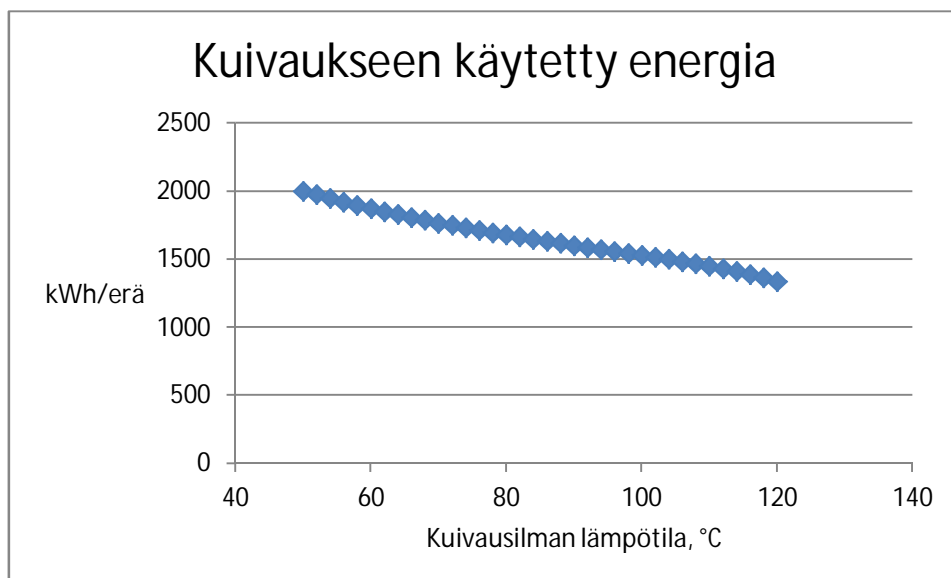
Kuivausilman lämpötila vaikuttaa hyvin paljon hyötysuhteeseen ja kuivauskapasiteettiin (kuvat 19 ja 20). Hyötysuhde kasvaa tasaisesti, 50 asteista kuivausilmaa käytettäessä hyötysuhde on 35% ja 120 asteista kuivausilmaa käytettäessä 53%. Kuivauskapasiteetti kasvaa vielä jyrkemmin. 50 asteisella kuivausilmalla kapasiteetti on 1,8 kg vettä minuutissa ja 120 asteisella kuivausilmalla 6,3 kg vettä minuutissa. Hyötysuhteen paraneminen näkyy hyvin kuivauserän energiantarpeesta (kuva 21).



Kuva 19. Kuivausilman lämpötilän vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



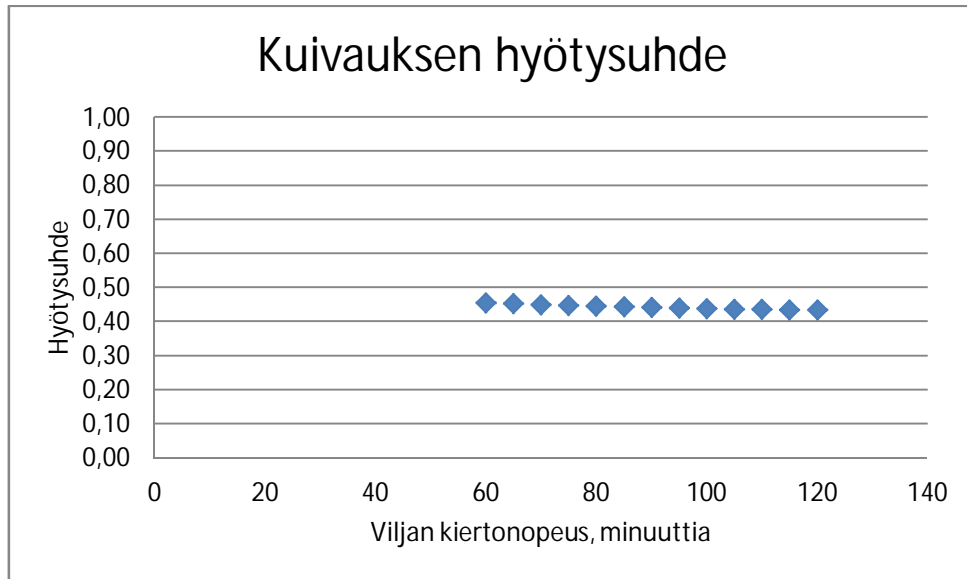
Kuva 20. Kuivausilman lämpötilan vaikutus kuivauskapasiteettiin.



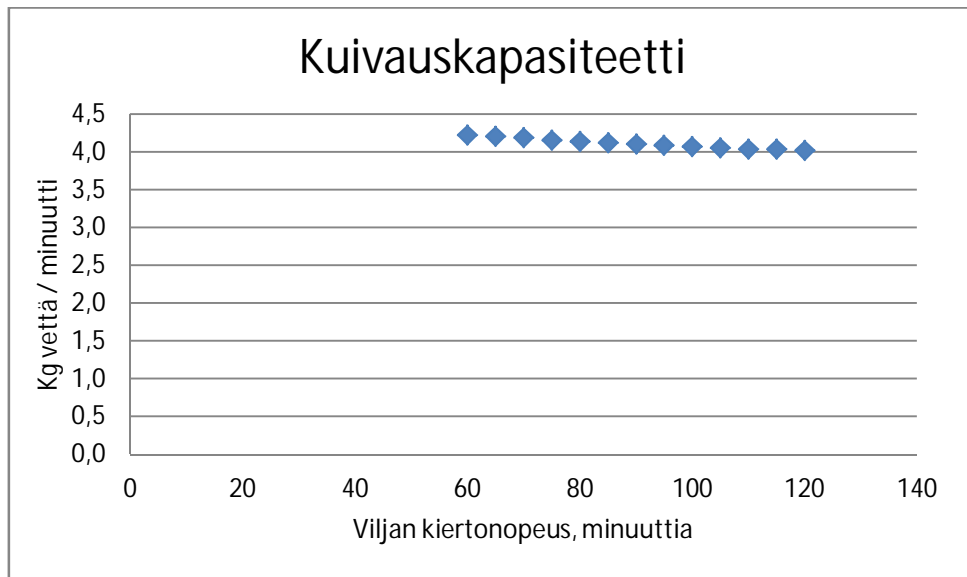
Kuva 21. Kuivaukseen käytetyn energian määrä kuivausilman lämpötilan mukaan.

5.3.6. Viljan kiertonopeus

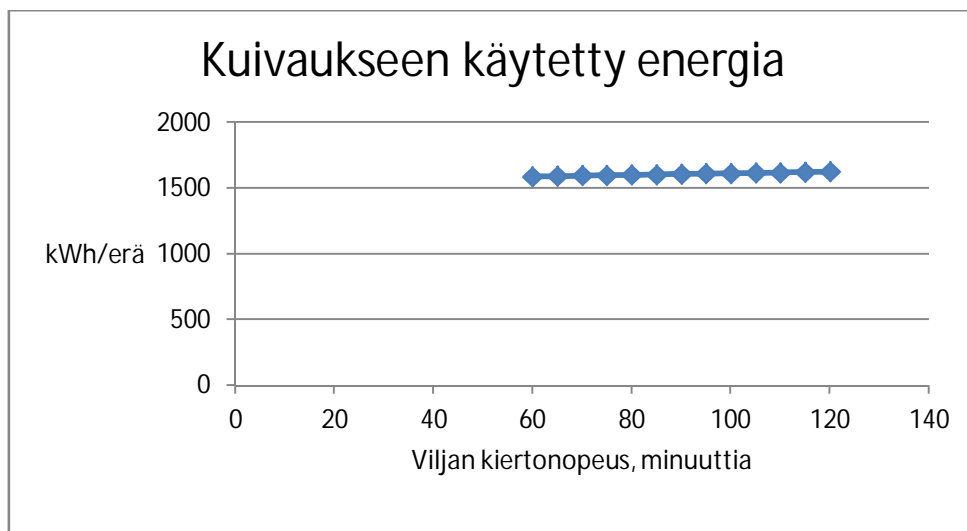
Viljan kiertonopeudella ei ole merkittävää vaikutusta. Hyötysuhde kuvassa 22 näyttää kasvavan hieman kiertoajan hidastuessa, mutta kuivauskapasiteetti (kuva 23) näyttää hieman laskevan, kun kierto hidastuu. Viljan kiertonopeus ei vaikuta kuivauserän energiantarpeeseen (kuva 24).



Kuva 22. Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



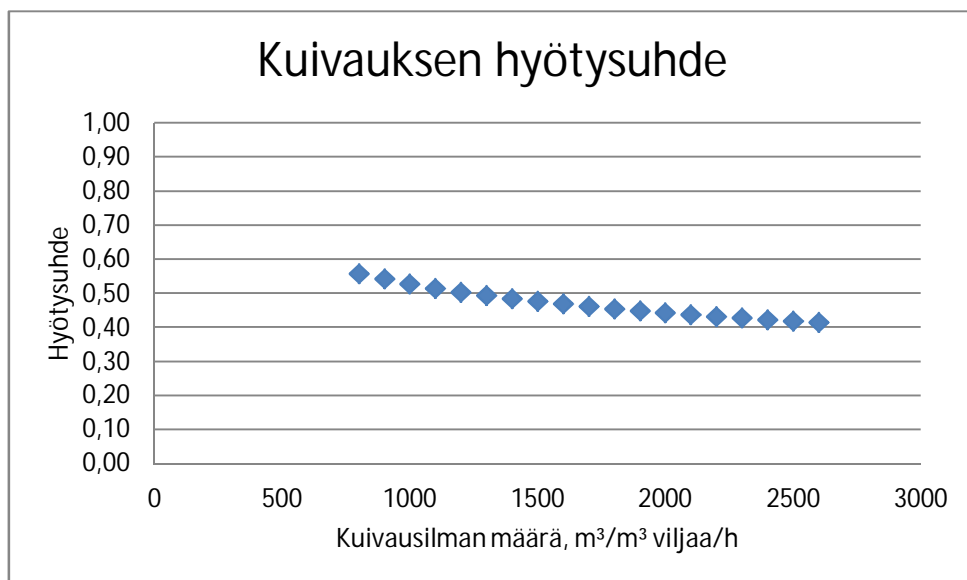
Kuva 23. Viljan kiertonopeuden vaikutus kuivauskapasiteettiin.



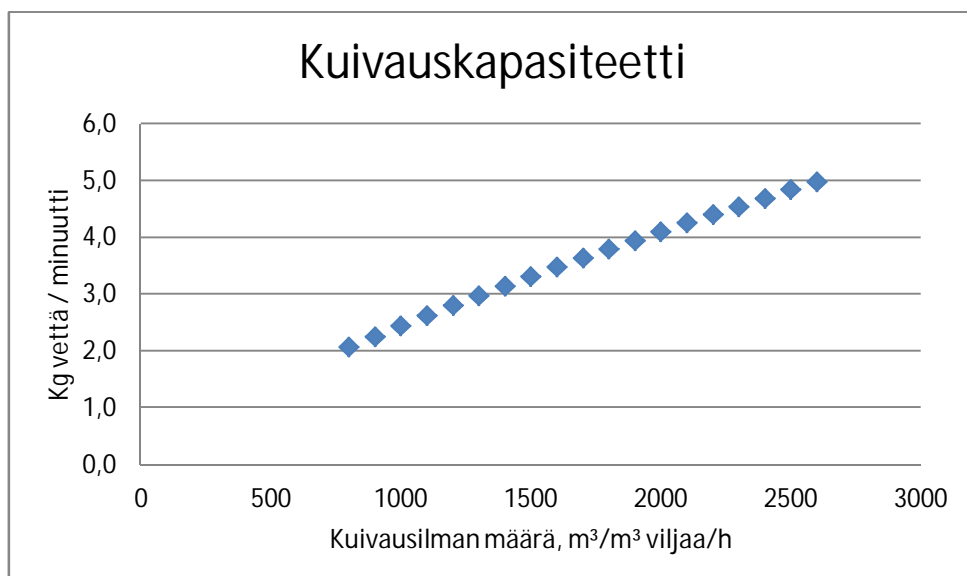
Kuva 24. Kuivaukseen käytetyn energian määrä viljan kiertonopeuden mukaan.

5.3.7. Kuivausilman määrä

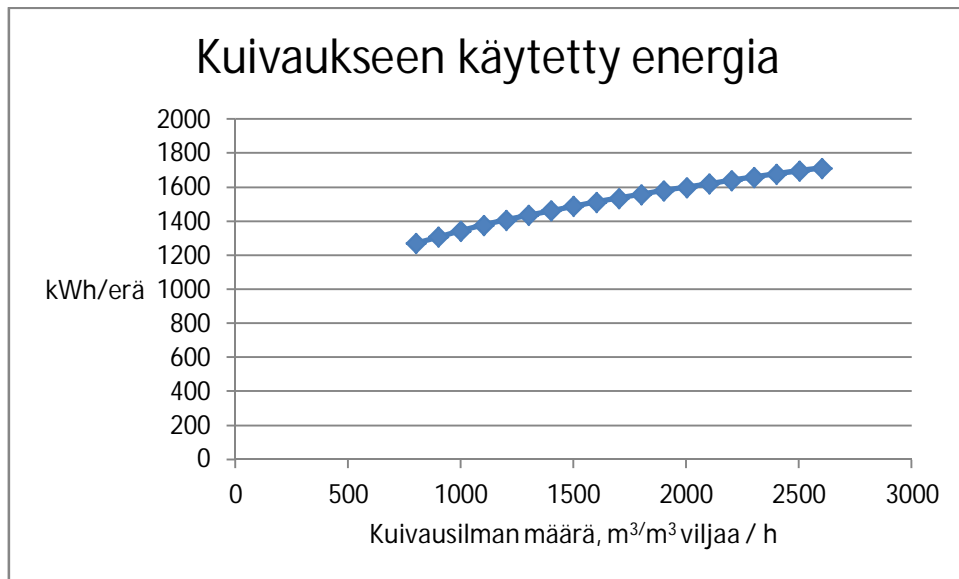
Pienellä kuivausilmamäärällä saavutetaan paras hyötysuhde (kuva 25). Simuloinnin perusteella 800 m³ ilmaa vilja-m³ kohti tunnissa hyötysuhde olisi 56% ja suurella ilmamäärällä, 2500 m³ ilmaa vilja-m³ kohti tunnissa, hyötysuhde laskee 41 prosenttiin. Kuivauskapasiteetti (kuva 26) kasvaa huomattavasti ilmamäärän lisääntyessä. Simuloinnin perusteella 800 m³ ilmaa vilja-m³ kohti tunnissa kapasiteetti olisi 2,1 kg vettä minuutissa ja suurella ilmamäärällä, 2500 m³ ilmaa vilja-m³ kohti tunnissa, kapasiteetti olisi 5,0 kg vettä minuutissa. Kuivauserän energiantarve kasvaa, kun kuivausilmamäärää lisätään (kuva 27). Tämä johtuu kuivauksen hyötysuhteen heikkenemisestä.



Kuva 25. Kuivausilmamäärän vaikutus kuivauksen hyötysuhteeseen.



Kuva 26. Kuivausilmamäärän vaikutus kuivauskapasiteettiin.



Kuva 27. Kuivaukseen käytetyn energian määrä kuivausilmamäärän mukaan.

5.4. Simuloinnin vertaaminen kokeellisiin tuloksiin

Taulukosta 5 selviää Viikin koetilan kuivurilla tehtyjen kuivausten tiedot. Kuivauskokeissa viljan kosteus mitattiin käsin alussa ja lopussa ja paino alussa ja lopussa. Kuivausilman lämpötilaa, ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta sekä ilmavirtaa mitattiin jatkuvasti kuivauksen aikana. Viljan tiheyttä ja viljan kiertonopeutta ei mitattu. Viljan tiheydeksi arvioitiin 700 kg/m^3 ja kiertonopeudeksi 60 minuuttia.

Ilmamääräksi laskettiin keskimäärin 620 m^3 ilmaa/ m^3 viljaa tunnissa. Ilmamäärä ei vaihdellut kuivauksen aikana eikä kuivauserien välillä ollut eroa ilmamäärissä. Ilmamäärä oli yllättävän pieni verrattuna aiemmissa tutkimuksissa ja tämän tutkimuksen herkkyyssanalyseissä käytettyihin verrattuna.

Poistuneelle vesimäärälle saatiin neljä eri menetelmin laskettua arvoa. Nämä olivat: painon perusteella poistunut vesimäärä, ilmavirran mukaan poistunut vesimäärä, loppupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella poistunut vesimäärä sekä alkupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella poistunut vesimäärä.

Ilmavirran ja painon perusteella lasketut poistuneet vesimäärät olivat lähimpänä toisiaan. Painon perusteella laskettu oli kahta erää lukuun ottamatta 4 - 78 kg suurempi, tämä voi johtua esim. siitä että kuivauksen aikana viljasta poistetaan kosteuden lisäksi roskaa ja pölyä toisaalta mittauksissa saattaa olla virhettä. Alkupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella saatu poistunut vesimäärä oli kaikissa tapauksissa 2 - 3 kertaa suurempi kuin muilla tavoin laskettu. Viljan ollessa kuivinta (erät 7 ja 14) loppupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella poistunut vesimäärä oli pienin, muuten se oli ilmavirran ja painon perusteella lasketun sekä alkupainon ja alku- ja loppukosteuksien välissä. Energiankulutukseksi saatiin 5,0 - 7,8 MJ haihtunutta vesikiloa kohden joten hyötysuhde vaihteli 32 – 50 % välillä.

Taulukko 5. Koetilan kuivausten tiedot kuivauserittäin.

Erä	6	7	8	10	12	14
Viljalaji	Ohra	Ohra	Ohra	Ohra	Ohra	Ohra
Kuivauslämpö, °C	77	70	74	75	79	80
Alkukosteus, %	17	15	17	20	17	16
Loppukosteus, %	13	14	12	14	14	14
Viljan paino alussa, kg	11830	11800	11700	11700	11700	11700
Viljan paino lopussa, kg	11510	11440	11450	11100	11300	11360
Imuilman RH	63	99	93	92	87	60
Imuilman lämpö, °C	22	15	19	20	24	25
Poistunut vesimäärä, kg						
ilmavirran mukana	431	282	345	576	396	314
painon perusteella	320	360	250	600	400	340
loppupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella	554	202	648	800	435	284
alkupainon ja alku- ja loppukosteuksien perusteella	1467	1565	1362	1495	1554	1586
Kuivausaika, h	3,7	3,7	3,9	5,2	3,9	2,8
Energiankäyttö MJ/kg H ₂ O	5,1	7,8	6,7	5,3	5,6	5,0
Ilmamäärä m ³ /m ³ viljaa/h	620	620	620	620	620	620

Taulukosta 6 selviää simulaattorin ja todellisten kuivurilla tehtyjen mittausten väliset erot. Energiankulutuksen erot ovat alle 20 % paitsi erissä 7 ja 14. Näiden erien viljakosteus on hyvin lähellä varastointikelpoista viljaa. Simulaattorilla

saatu energiankulutus on huomattavasti pienempi kuin todellisen kuivauksen. Viljan ollessa kosteampaa kuin 16 % simulaattori näyttäisi toimivan kohtuullisesti. Kuivausajoissa simulaattori näyttää kostealla viljalla yliarvioivan kuivausajan.

Taulukko 6. Simulaattorin ja koetilan kuivurin kuivausten väliset erot.

Eristetty kuivuri	erä6	erä7	erä8	erä10	erä12	erä14
Alkukosteus	17	15	17	20	17	16
Loppukosteus	13	14	12	14	14	14
Imuilman RH	63	99	93	92	87	60
Imuilman T	22	15	19	20	24	25
Kuivauslämpö	77	70	74	75	79	80
Tilan kuivuri						
MJ/kg H ₂ O	5,1	7,8	6,7	5,3	5,6	5
kWh	611	615	640	847	620	437
aika, min	222	222	234	312	234	168
Simulaattori						
MJ/kg H ₂ O	4,7	3,8	7,77	5,63	4,55	3,31
kWh	563	300	745	906	500	289
aika, min	374	195	486	616	326	192
Ero						
MJ/kg H ₂ O	-8 %	-51 %	16 %	6 %	-19 %	-34 %
kWh	-8 %	-51 %	16 %	7 %	-19 %	-34 %
aika, min	68 %	-12 %	108 %	97 %	39 %	14 %

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1. Simuloimalla saadut tulokset

6.1.1. Simulointisarja

Simulointisarjan perusteella voidaan päätellä, että säädöt vaikuttavat kuivauksen energiatehokkuuteen. Eri säädöillä saatiin suuria eroja energiatehokkuudessa. Todelliset energiansäästömahdollisuudet ovat kuitenkin pienempiä, kuin tutkimuksessa saadut, sillä käytetyt kuivauslämpötilat ovat jo

nykyisin melko korkealla tasolla ja kiertonopeus sekä ilmamäärä on säädetty sopivalle tasolle. Tutkimuksen mukaan paras energiatehokkuus saatiin säädöillä, joissa käytettiin suurta kuivauslämpöä, pientä ilmamäärää ja nopeaa kiertoa. Heikoin hyötysuhde saatiin vastaavasti pienellä kuivauslämmöllä ja suurella ilmamäärällä sekä hitaalla kierrolla. Myös kirjallisuudessa kuivausilman suuremmalla lämmöllä, nopealla kierrolla sekä pienellä ilmamäärällä todettiin päästävän parempaan hyötysuhteeseen. Toisaalta kuivauksen loppuvaiheessa hyötysuhteen todettiin paranevan, mikäli kiertoa hidastetaan, tämä on vastoin saatuja tuloksia. Simulaattorissa kiertonopeutta ei ollut mahdollista muuttaa kuivauksen aikana, joten kierto on syytä pitää nopeana, jotta saavutetaan mahdollisimman tasainen kuivuminen ja vältetään kuivausvaurioita. Toisaalta nopeamman kierron on todettu hidastavan viljan lämpenemistä kuivauksen alussa ja näin ollen heikentävän kuivausnopeutta.

6.1.2. Herkkyysanalyysi

Kuivausprosessi on herkkä kuivausilman lämpötilalle, viljan kosteudelle ja kuivausilman määrälle sekä jokseenkin herkkä viljan tiheydelle ja ulkoilman lämpötilalle. Kuivausprosessi ei ole juurikaan herkkä ulkoilman kosteudelle ja viljan kiertonopeudelle. Ulkoilman kosteus ei vaikuta prosessiin, koska lämpimän kuivausilman ja kylmän ulkoilman välinen absoluuttinen veden sitomiskyvyn ero on hyvin suuri. Lämpimän kuivausilman suhteellinen kosteus on aina hyvin pieni, vaikka ulkoilma olisi kosteaa. Viljan kiertonopeudellakaan ei näyttäisi olevan merkitystä kuivausprosessille tämän tutkimuksen perusteella.

Ulkoilman lämpötila vaikuttaa hieman kuivauksen energiatehokkuuteen. Tämä johtuu siitä että lämpimämpää ilmaa tarvitsee lämmittää vähemmän kuin kylmempää. Täten kuivattaessa lämpimällä säällä voidaan säästää energiaa verrattuna siihen että kuivattaisiin kylmällä säällä. Kuivaaminen 25 asteen lämpötilassa verrattuna kuivaamiseen 1 asteen lämpötilassa säästäisi jopa 25 % energiaa. Nämä olosuhteet ovat kuitenkin harvinaisia, useimmiten kuivausaikana ulkoilman lämpötila on n. 5 - 15 astetta. Viiden asteen ero ulkoilmassa tarkoittaa n. 6 % energiansäästöä. Voidaan siis todeta, että kuivaaminen olisi järkevää tehdä mahdollisimman lämpimällä säällä ja näin

energiaa voitaisiin säästää. Kirjallisuudessa on todettu samoin. Energiansäästön on todettu olevan suurempikin, viiden asteen lämpötilan nousulla 9 %.

Viljan tiheyden vaikutus ei ole järin suuri, mutta hyvälaatuisen sadon, jolla on korkea hehtolitrapaino (tiheys) viljeleminen on järkevää myös energiatalouden kannalta. Esim. välillä 620 kg/m^3 - 750 kg/m^3 energiansäästö olisi n. 5 %. Toisaalta hyvälaatuisen sadon arvo olisi muutenkin suurempi.

Kuivausilman lämpötilaa nostamalla voidaan helposti säästää energiaa. Lämpötilan nosto 70 asteesta 90 asteeseen säästää energiaa n. 10 %. Lämpötilaa voidaan nostaa vieläkin enemmän, mikäli viljaa ei aiota käyttää siemeneksi. Lämpötilaa voidaan nostaa esim. eristämällä kuivuri tai lisäämällä uunin tehoa. Samalla myös kuivauskapasiteetti nousee merkittävästi. Kirjallisuudessa kuivausilman lämpötilan nostamisella saavutettiin samansuuruinen energiansäästö.

Kostean viljan kuivaaminen on energiatehokkaampaa kuin märän viljan. Silti vilja kannattaa puida mahdollisimman kuivana. Kostean kuivaaminen on aina turhaa, mikäli vilja olisi voitu korjata kuivempana. Energiaa voidaan säästää paljon, jos vilja saadaan korjattua kuivempana. Käytetyn energian määrä on yli 10-kertainen jos viljan kosteus on 30 % verrattuna viljaan, jonka kosteus on 15 %. Kirjallisuudessa viljan puintikosteus vaihtelee merkittävästi vuorokauden ajan ja sään mukaan, joten puintiajankohdalla on suuri merkitys kuivauksen energinakulutukseen.

Kuivausilman määrä vaikuttaa myös hyvin paljon energiankulutukseen ja kuivauskapasiteettiin. Energiatehokkuus on paras, kun ilmamäärä on pieni, jolloin poistuva ilma on aina mahdollisimman kosteaa. Suuremmilla ilmamäärillä energiatehokkuus huononee, koska kuivurin läpi menee ilmaa, joka olisi voinut sitoa viljasta enemmän vettä itseensä. Kuivauskapasiteetti kuitenkin kasvaa, koska kosteus poistuu varmasti ja tehokkaammin märän viljan seasta.

6.2. Simuloinnin vertaaminen kokeellisiin tuloksiin

Kokeellisesti saatuja mittauksia oli vähän, joten kovin tarkkoja päätelmiä niistä ei voi tehdä. Useat muuttujien arvot vaihtuvat kuivauserien välillä, ja onkin mahdotonta tietää, minkä olosuhteen muutos vaikuttaa eniten energiankulutuksen muutokseen. Suuntaa-antavia päätelmiä näistäkin tuloksista voidaan silti päätellä. Kokeellisesti pienimmät energiankulutukset saatiin, kun ulkoilma ja kuivausilma olivat lämpimimpiä ja ilman suhteellinen kosteus mahdollisimman pieni. Saatu tulos on samankaltainen kuin aiemmissakin tutkimuksissa on todettu.

Kaikki kuivauserät olivat melko kuivia (w.b. alle 20 %). Kuivausprosessi on herkin viljan kosteudelle, joten voidaan vertailla viljan kosteuden vaikutusta energiankulutuksen eroihin simuloinnissa ja todellisissa kuivauksissa. Simuloinnin ja kuivurimittausten välinen ero on suurin, kun vilja on jo lähes varastointikelpoista. Mitä kuivempaa vilja on, sitä suuremmaksi ero näyttäisi tulevan. Simulaattori ei nähtävästi huomioi viljan kuivumisen hidastumista kuivauksen loppuaiheessa riittävästi. Viljan kosteuden ollessa alussa vähintään 17 % erot energiankulutuksessa ovat alle sallitun 20 %:n rajan. Näissä kosteuksissa simulaattorin voidaan todeta toimivan. Kuivemmalla viljalla energiankulutus aliarvioidaan. Kuivausajan osalta simulaattori antaa hyväksyttäviä tuloksia kuivalla viljalla, mutta kosteammalla viljalla kuivausajan tarve yliarvioidaan.

6.3. Virheiden arviointi

6.3.1. Simulaattori ja herkkyysanalyysi

Simulaattorissa kuivausta on yksinkertaistettu, jotta laskentaa voidaan suorittaa tavallisella tietokoneella. Yksinkertaistaminen saattaa muuttaa saatuja tuloksia jonkin verran. Simulaattori ei ota huomioon kaikkia mahdollisia

kuivausprosessiin vaikuttavia tekijöitä. Näiden muuttujien vaikutus on oletettu merkityksettömäksi tai niitä ei ole osattu ottaa huomioon.

6.3.2. Kokeelliset mittaukset

Kuivausprosessissa mahdollisia epävarmuustekijöitä on melko paljon ja niiden tarkka suuruuden määrittäminen on melko hankalaa. Kokonaisvirhe saattaa muodostua melko suureksi. Mikäli päästään epävarmuudessa alle 20 % voidaan olla tyytyväisiä saatuihin tuloksiin.

Kokeellisesti saatujen tuloksien epävarmuuteen vaikuttavat kokeiden määrä (vähyys) ja käytetyt mittausten menetelmät.

Viljan tiheys ja viljan kiertonopeus kuivurissa on arvioitu tavanomaiselle tasolle, kun mittaustuloksia ei ollut. Toisaalta nämä eivät aiempien tutkimuksien ja simuloinnin perusteella ole kovin merkittäviä muuttujia kuivausprosessissa.

Koekuivausten viljan kosteus on mitattu käsimittarilla kerran tai kahdesti kuivauserän alussa ja lopussa. Se ei ota huomioon mahdollisia kuivauserän sisällä olevia eroja. Koekuivauksen ilmamäärä oli yllättävän pieni verrattuna aiempiin tutkimuksiin. Tämä saattoi vaikuttaa saatuihin tuloksiin.

Koekuivurilla viljaerän paino on mitattu alussa ja lopussa. Viljaerän painot on ilmoitettu 10 kg:n erotuskyvyllä. Punnituksen tarkkuus lienee kuitenkin parhaimmillaan lähempänä sataa kilogrammaa. Alku- ja loppupainon erotukseksi on päätelty poistunut vesimäärä. Kuivauksen aikana viljan seasta poistuu jonkin verran pölyä ja roskaa, mikä myös vähentää loppupainoa. Suurin osa roskasta poistuu kuitenkin jo kuivurin täyttövaiheessa, joten tällä ei liene kovin suurta merkitystä. Koekuivauksissa olosuhteet vaihtelevat aina jonkin verran kuivauksen aikana. Tätä virhettä on pyritty estämään, siten että tarkasteltaviksi on otettu vain sellaisia kuivauseriä, joiden olosuhteet pysyvät jokseenkin samoina koko kuivauksen ajan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1. Simulaattorin antamat tulokset verrattuna kokeisiin

Simulointi antaa samankaltaisia tuloksia kuin on odotettukin aiempien tutkimusten perusteella. Koekuivauksiin verrattuna simulaattori antaa tarpeeksi samanlaisia tuloksia, silloin kun viljan alkukosteus on vähintään 17 % (w.b.). Simulaattori ei ilmeisesti huomioi viljan kuivumisen hidastumista riittävästi, silloin kun viljan kosteus on jo hyvin lähellä varastointi kosteutta. Voitaisiin olettaa, että simuloinnin tulokset lähentyisivät kokeellisia tuloksia, jos vilja olisi alussa kosteampaa. Tähän tarvittaisiin kuitenkin varmistus uusilla koekuivauksilla, joissa on ollut käytettävissä määmpää viljaa.

7.2. Energiansäästömahdollisuudet

Suurimmat energiansäästömahdollisuudet viljan korjuussa kohdistuvat korjuuajankohtaan, myös kuivausajan olosuhteet vaikuttavat merkittävästi. Mikäli vilja puidaan väärään aikaan, ei kuivuria säätämällä enää voida merkittävästi vaikuttaa kuivauksen energiankulutukseen. Lisäksi kuivaukseen kuluva energia voidaan säästää helposti melko paljon kuivurin eristämällä ja huoltamisella sekä ylikuivauksen estämisellä. Aluksi täytyy siis huolehtia edellä mainittujen asioiden olevan kunnossa. Tämän jälkeen voidaan saada lisäsäästöjä kuivausta säätämällä. Korkealla kuivauslämmöllä ja oikeaksi säädetyllä ilmamäärällä vilja saadaan kuivattua pienemmällä energian kulutuksella. Automatisointi ja kuivausprosessin säätö kuivauksen aikana lisää vielä energiansäästöä.

7.3. Mahdolliset jatkotutkimukset

Tiedetään, että kuivaus hidastuu kuivauksen loppuvaiheessa. Tällöin viljan kuivattamisen vaatimukset ovat erilaiset kuivauksen alkuvaiheeseen verrattuna. Vielä voitaisiin tutkia mahdollisesti samankaltaisen simulaattorin avulla

kuivausprosessin energiankulutusta, kun prosessi olisi jaettu kahteen vaiheeseen. Vaiheiden välillä kuivuria voitaisiin säätää. Toisaalta voitaisiin pyrkiä rakentamaan sellainen kuivuri, joka mittaa energiatehokkuutta jatkuvasti ja tämän perusteella kuivuri säätyisi myös jatkuvasti automaattisesti optimaaliselle energiankulutustasolle, tiettyjen reunaehtojen, esim. tarvittavan kuivauskapasiteetin asettamissa rajoissa.

8 KIITOKSET

Haluan osoittaa kiitokset työnohjaajalle professori Jukka Ahokkaalle, simulaattorin tehneelle MMT Johannes Tiusaselle sekä kuivurimittaukset tehneelle MMM Tapani Jokiniemelle.

LÄHTEET

- Ahokas, J. & Koivisto, K. 1983. Energiansäästö viljankuivauksessa. Tutkimuslaskelma n:o 31. Vakola. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Vihti 1983.
- Ahokas, J. ja Hautala, M. 2011. Maatilakuivurit. Helsingin yliopisto.
- Giner, S.A. & Bruce, D.M. 1998. Two-Dimensional Simulation Model of Steady-State Mixed-flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation. Journal of Agricultural Engineering Research 71
- Järvenpää, M. & Laurola, H. 1987. Puintiopus. työteho-seuran julkaisuja 290. 129s. Helsinki 1987.
- Loewer, O. J., Bridges, T.C. & Bucklin, R.A: 1994. On-Farm Drying and Storage Systems. s.22-24
- Mikkola, H. J. & Ahokas, J. 2009. Suomalaisten peltokasvien energiatase ja nettoenergia. 2009. Maataloustieteen päivät 2010.
<http://www.smts.fi/jul2010/esite2010/091.pdf> Viitattu 27.1.2012.
- MMM työryhmämuistio 9:2009. Maatilojen energiaohjelman toimeenpanoa valmistele- van työryhmän loppuraportti. Helsinki 2009.
- Peltola, A. 1985. Energian säästäminen viljankorjuussa. Työteho-seuran maataloustiedote 1/1985.
- Peltola, A. 1987. Lämminilma-kuivuri kehitty- y entistä paremmaksi. Työteho-seuran maataloustiedote 4/1987.
- Peltola, A. 1988. Viljan kuivurin säätö kuivauksen aikana – hyödyksi vai hienostelua? Työteho-seuran maataloustiedote 4/1988.

Peltola, A. 1989. Viljan kuivauksen energiankulutus ja sen vähentämismahdollisuudet. Työtehoseuran maataloustiedote 11/1989.

Peltola, A. 1997. Viljaa kierrättävän lämminilmakuivurin säädöt, kuivausilman lämpötilan ja massavirtauksen sekä viljan kierrätyksen vaikutus viljaa kierrättävän sekavirtaustyyppisen lämminilmakuivurin tehoon ja energina kulutukseen. Työtehoseuran julkaisuja 355.

Piltili, M. 1979. Energian tarpeen vähentämisestä ja kotimaisen energian käytöstä viljan kuivauksessa. Tutkimusselostus n:o 19. Vakola. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Helsinki 1979.

Suomala, E. & Peltola, A. 1988. Kuivausilman lämpötilan ja kuivurin sisäisten kuumien metallipintojen vaikutus ohran elinvoimaan viljaa kierrättävässä sekavirtaustyyppisessä kuivurissa. Työtehoseuran maatalous- ja rakennusosaston monisteita 1/1988.

Suomala, E. & Peltola, A 1987. Viljan elinvoiman muutos kuivausvaurion mittarina korkeiden lämpötilojen kuivauskokeissa. Työtehoseuran maataloustiedote 6/1987.

Tike 2010. Maatilatilastollinen vuosikirja 2010. s. 95 - 106

